

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2013

Jiří Kloda

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Simulace střídačů a střídavých měničů v programu
OrCAD PSpice
Simulation of Inverters and AC/AC Converters in OrCAD
PSpice

2013

Jiří Kloda

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Jiří Kloda

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika

Téma:

Simulace střídačů a střídavých měničů v programu OrCAD PSpice
Simulation of Inverters and AC/AC Converters in OrCAD PSpice

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te teoretický rozbor střídačů a střídavých měničů.
2. Vytvořte simulační modely střídačů a střídavých v programu OrCAD PSpice.
3. Ověřte funkčnost simulačních modelů pro různé provozní stavy a zátěže.

Seznam doporučené odborné literatury:

Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 1 - Přehled výkonových polovodičových součástek. Plzeň: ZČU 1994.

Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 2 - Měniče s vnější komutací. Plzeň: ZČU 1994.

Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 3 - Měniče s vlastní komutací a bez komutace. Plzeň: ZČU 1998.

Pavelka, J., Čeřovský, Z., Lettl, J.: Výkonová elektronika, Praha: skriptum ČVUT 2007.

Rashid, M. H.: Power Electronics Handbook. Pensacola, Florida 2001.

Rombaut, Ch., Seguiet, G., Bausiere, R.: Power electronic converters: AC-AC conversion, New York: McGraw-Hill, 1987.

Záhlava, V.: OrCAD 10. Praha: Grada, 2004.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Vaculík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7.5.2013

Jiří Kola

Podpis autora

Poděkování

Tato práce byla vypracována s podporou projektu Nové kreativní týmy v prioritách vědeckého bádání, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0055 podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancovaného Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Děkuji především panu Ing. Petrovi Vaculíkovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace při přípravě mé bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je, teoreticky popsat a následně vytvořit simulační modely střídačů a střídavých měničů v programu OrCAD PSpice. Simulační modely obvodů a jejich výstupní charakteristiky pro nejpoužívanější parametry jsou v praktické části této práce. Výstupní charakteristiky sloužící, k ověření funkčnosti pro různé provozní stavy a zátěže se nacházejí v příloze této práce.

Klíčová slova

střídač, střídavý měnič, OrCAD PSpice, komutace, simulace

Abstract

The aim of this work is to theoretically describe and then create simulation models inverters and AC/AC converters in the OrCAD PSpice. Simulation models this circuit and their output characteristics for the most common parameters are the practical part of this work. Output characteristics used to verify the functionality for various operating conditions and load are located in the Appendix to this work.

Keywords

inverter, AC/AC converter, OrCAD PSpice, commutation, simulation

Seznam použitých symbolů a zkratek

$B_{(n)}$	amplituda n -té harmonické složky	(V)
C	kondenzátor, elektrická kapacita	(F)
C_F	filtrační kondenzátor, kapacita filtračního kondenzátoru	(F)
DPS	deska plošného spoje	
f	kmitočet střídavého napětí a proudu	(Hz)
f_1, f_2	kmitočet napětí a proudu střídavého měniče kmitočtu - vstupní, výstupní	(Hz)
GTO	Gate turn-off thyristor	
i, I	fázový proud střídavého napájecího zdroje - okamžitá hodnota, efektivní hodnota	(A)
$i_{(n)} I_{(n)}$	n -tá harmonická fázového proudu střídavého zdroje - okamžitá hodnota, efektivní hodnota	(A)
i_1, i_2, i_3	okamžité hodnoty fázových proudů střídavého napájecího zdroje ve fázích 1,2,3	(A)
i_c	okamžitá hodnota proudu kondenzátoru	(A)
i_d, I_d	usměrněný proud - okamžitá hodnota, střední hodnota	(A)
i_V	okamžitá hodnota proudu polovodičové součástky	(A)
i_{VR}	okamžitá hodnota proudu zpětné diody	(A)
i_Z	okamžitá hodnota proudu zátěže střídače, střídavého měniče napětí a střídavého měniče kmitočtu	(A)
i_{Z1}, i_{Z2}, i_{Z3}	okamžité hodnoty proudů ve fázích zátěže 1, 2, 3	(A)
$I_{Z(n)}$	efektivní hodnota n -té harmonické proudu zátěže	(A)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor	
KO	komutační obvod	
L	cívka, indukčnost cívky	(H)
m	počet fází	
p, P	činný výkon – okamžitá hodnota, střední hodnota	(W)
$P_{(1)}$	činný výkon 1. harmonické složky	(W)
P_n	okamžitá hodnota výkonu odebíraného n -tou fází m -fázové zátěže	(W)
PWM	Pulse Width Modulation	
$Q_{(1)}$	jalový výkon 1. harmonické složky	(var)
Q_L	napěťové množství přivedené v určitém časovém intervalu	(C)
Q'_L	napěťové množství odčerpané v určitém časovém intervalu	(C)
R	rezistor, elektrický odpor	(Ω)
S	tyristorový spínač	
T	perioda střídavého napětí a proudu	(s)
u, U	fázové napětí střídavého napájecího zdroje	(V)

u_1, u_2, u_3	okamžité hodnoty fázových napětí střídavého napájecího zdroje příslušející fázím 1,2,3	(V)
u_d, U_d	usměrněné napětí nebo napětí na stejnosměrných svorkách střídače - okamžitá hodnota, střední hodnota	(V)
U_i	zdroj napětí obsažen v zátěži	(V)
u_L	okamžitá hodnota napětí na indukčnosti	(V)
U_m	amplituda fázového napětí střídavého napájecího zdroje	(V)
u_r	řídící napětí vstupující do bloku napětí	(V)
u_V	okamžitá hodnota napětí na polovodičové součástce	(V)
u_{VR}	okamžitá hodnota napětí na zpětné diodě	(V)
$U_{Z(n)}$	efektivní hodnota n -té harmonické fázového napětí zátěže	(V)
U_{Zs}	efektivní hodnota sdruženého napětí zátěže	(V)
$U_{ZS(n)}$	efektivní hodnota n -té harmonické sdruženého napětí zátěže	(V)
UPS	Uninterruptible Power Supply	
V	polovodičová součástka	
VR	zpětná dioda	
Z	zátěž, impedance	(Ω)
α	úhel řízení, úhel zpoždění komutace	($^\circ$)
β	úhel předstihu komutace	($^\circ$)
γ	bezpečnostní úhel	($^\circ$)
φ	fázový posun proudu za napětím	(-)
$\varphi_{(1)}$	posun 1. harmonické proudu za napětím	(-)
χ	elektrický úhel	(-)
ψ	úhel sepnutí polovodičové součástky	(-)
ψ_S	skutečný úhel sepnutí spínače	(-)
ψ_R	úhel sepnutí zpětné diody	(-)
ω	úhlový kmitočet	(s^{-1})

Obsah

Úvod.....	10
Teoretická část.....	11
1 Střídače.....	11
1.1 Základní popis.....	11
1.1.1 Dělení podle způsobu komutace.....	11
1.1.2 Dělení podle charakteru napájecího zdroje.....	13
1.2 Základní obvodové principy.....	13
1.2.1 Jednofázová zapojení.....	13
1.2.2 Trojfázová zapojení.....	15
1.3 Napět'ové střídače.....	16
1.3.1 Průchod činného a jalového výkonu u napět'ových střídačů.....	16
1.3.2 Jednofázový napět'ový střídač v můstkovém zapojení.....	16
1.3.3 Trojfázový napět'ový střídač v můstkovém zapojení.....	21
1.4 Proudové střídače.....	26
1.4.1 Komutační obvod proudového střídače.....	26
1.4.2 Průchod činného a jalového výkonu u proudových střídačů.....	28
1.4.3 Analýza při obdélníkovém řízení.....	29
2 Střídavé měniče.....	32
2.1 Měniče kmitočtu.....	32
2.1.1 Nepřímé měniče kmitočtu.....	33
2.1.2 Přímé měniče kmitočtu.....	33
2.2 Střídavé měniče napětí.....	36
2.2.1 Jednofázový střídavý měnič napětí.....	36
Praktická část.....	41
3 OrCAD PSpice.....	41
3.1 Základní popis.....	41
3.2 PSpice.....	41
4 Simulace.....	42
4.1 Jednofázový napět'ový střídač v můstkovém zapojení.....	42
4.2 Trojfázový napět'ový střídač v můstkovém zapojení.....	43
4.3 Jednofázový proudový střídač.....	45
4.4 Trojfázový proudový střídač.....	47

4.5	Jednofázový střídavý měnič napětí.....	48
4.6	Trojfázový střídavý měnič napětí.....	49
Závěr		52
Literatura		53

Úvod

Tématem bakalářské práce jsou střídače a střídavé měniče, které jsou nedílnou součástí civilizovaného světa, a každý člověk žijící v civilizaci se s nimi dostává do styku. Střídače se vyskytují tam kde, máme k dispozici pouze stejnosměrný zdroj energie, a je zapotřebí energii střídavou např. jsou v zařízeních UPS, kde z akumulátoru dokážou střídavé zařízení udržovat v chodu. Také se hojně střídače využívají ve fotovoltaice, která v posledních letech v české republice zažila rozmach. A samozřejmě nesmím zapomenout zmínit důležitost střídačů v elektrických pohonech. Střídavé měniče jsou zapotřebí tam, kde potřebujeme střídavé napětí řídit. Ať už se jedná o frekvenci, nebo amplitudu. Střídavé měniče se používají například v elektrických pohonech, pro jejich řízení.

Program OrCAD a jeho simulační část PSpice nám umožní tyto střídače a střídavé měniče nasimulovat a otestovat tak jejich vlastnosti, bez nutnosti fyzického vyrobení daného měniče. Což je nesporně velkou výhodou. OrCAD PSpice, proto také bývá velmi využíván při návrzích elektronických obvodů pro simulaci jeho vlastností, a kontrolu použitých součástek ještě před fyzickým vyrobením, což při odhalení chyby znamená také značně ušetřit náklady. OrCAD také umožňuje samotný návrh desky plošného spoje.

Cílem této práce je teoreticky popsat chování a vlastnosti střídačů a střídavých měničů, vysvětlit princip fungování, což je učiněno v její teoretické části. Následně v praktické části jsou vytvořeny simulační modely nejdůležitějších zástupců střídačů a střídavých měničů pro různé provozní stavy a zátěže. Tím prakticky ověřujeme jejich funkčnost. Tyto simulační modely jsou vytvářeny uživatelsky přívětivě, aby byla možnost je ještě dále v případě potřeby využívat při výuce např. výkonových polovodičových součástek, nebo výkonových spínacích prvků a nebyly vytvářeny pouze pro účel této práce.

Teoretická část

1 Střídače

1.1 Základní popis

1.1.1 Dělení podle způsobu komutace

Měniče, které mají jak střídavou tak stejnosměrnou stranu, se dělí podle způsobu, v jakém chodu daný měnič převážně pracuje. Pracuje-li převážně v usměrňovačovém chodu jedná se o usměrňovač, pracuje-li převážně ve střídačovém chodu jde o střídač. Střídače jsou velkou třídou měničů se základním dělením, na střídače s vnější komutací, střídače s vlastní komutací a střídače bez komutace.

Střídače s vnější komutací, tedy takové, které by byly komutovány střídavou sítí, prakticky nefungují, ale teoreticky by se daly popsat jako usměrňovače s obráceným tokem elektrické energie ze stejnosměrného zdroje do sítě střídavého napětí. Vnější komutace se využívá v elektrických pohonech pomocí usměrňovačů pro její možnost oboustranného přenosu energie ze střídavé na stejnosměrnou a opačně. Ovšem zdrojem komutačního napětí, nemusí být pouze veřejná síť střídavého napětí, může se jednat také o synchronní či asynchronní motor doplněný kondenzátory.

V této práci se ovšem budeme zabývat hlavně střídači s vlastní komutací. Takového střídače musí být vybaveny vypínatelnými součástkami anebo musí mít komutační (vypínací) obvody.

Vzhledem k vývoji vypínatelných součástek se u střídačů s vlastní komutací používají vypínatelné součástky, které nemají komutační obvody vůbec. Tyto střídače mohou napájet autonomní elektrické sítě, složené z jakékoli zátěže. Využívají se například jako zdroje proměnného kmitočtu pro napájení střídavých motorů s proměnnými otáčkami, nebo jako dočasné zdroje pro střídavé spotřebiče nutné udržet v chodu i po výpadku napětí sítě. V další části této kapitoly se budeme zabývat především těmito střídači.

Střídače bez komutace jsou uspořádány tak, že proud v jednotlivých větvích měniče klesá na nulu bez přičinění vlastního, nebo vnějšího zdroje komutačního napětí.

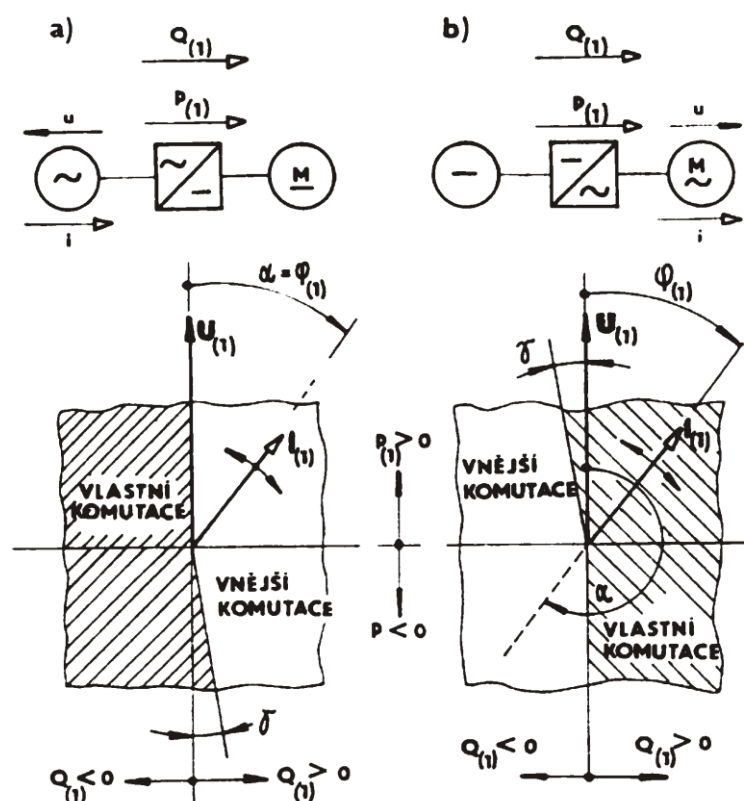
Na obr. 1.1 vidíme dva měniče se střídavou a stejnosměrnou stranou. U oblasti a) je na střídavé straně předpokládán zdroj např. rozvodná síť, takže pro označení kladných smyslů veličin volíme tzv. zdrojový systém (nesouhlasný kladný směr napětí a proudu). Pro oblast b) předpokládáme na střídavé straně zátěž např. asynchronní motor, čili pro označení kladných smyslů veličin používáme tzv. spotřebičový systém (souhlasný kladný směr napětí a proudu).

Pro činný a jalový výkon 1. harmonických složek pro oba měniče platí vztahy

$$P_{(1)} = mU_{(1)}I_{(1)}\cos\varphi_{(1)} \quad (1.1)$$

$$Q_{(1)} = mU_{(1)}I_{(1)}\sin\varphi_{(1)} \quad (1.2)$$

Kde $U_{(1)}$, $I_{(1)}$ jsou efektivní hodnoty 1. harmonických složek fázového napětí a proudu, m je počet fází a $\varphi_{(1)}$ je zpoždění fázového proudu za fázovým napětím pro 1. harmonické.



Obr. 1.1 Vlastní a vnější komutace měniče se střídavou a stejnosměrnou stranou. (1)

Při pohledu na fázorový diagram s přihlédnutím na zvolené kladné smysly vidíme, že na obr. 1.1a jde výkon vydávaný střídavou stranou, zatímco na obr 1.1b střídavá strana výkon přímá. Takže na obr 1.1a vystihuje odběr činného a jalového výkonu ze střídavé strany a obr 1.1b vystihuje odběr činného a jalového výkonu stranou střídavou.

Měniče s vnější komutací mívají kladné smysly obvykle označovány stejně jako na obr 1.1a. Máme-li takovéto kladné smysly je $\varphi_{(1)}$ prakticky roven úhlu řízení měniče α a to z toho důvodu že regulační rozsah úhlu řízení je u měničů s vnější komutací dán nerovnicí

$$0 < \alpha < \pi - \gamma \quad (1.3)$$

kde γ je tzv. bezpečnostní úhel. Fázor $I_{(1)}$ se při vnější komutaci měniče může pohybovat pouze v nevyšrafované oblasti vnější komutace. Vyvozujeme z toho, že při vnější komutaci může střídavá strana vydávat i přijímat činný výkon, ale jalový výkon může být pouze odebírán.

Na obr 1.1b je třeba na fázovém diagramu kvůli uvažování kladných smyslů uhel α odečítat jak je znázorněno. V souvislosti s tím pak vyznačujeme oblast vlastní a vnější komutace. Poté předpokládáme, že odběr jalového výkonu zátěží, má fázor $I_{(1)}$ ve vyšrafované oblasti vlastní komutace.

Souhrnně řečeno potřebujeme-li, odběr jalového výkonu střídavou stranou musíme použít měnič s vlastní komutací, a ta je potřebná i v případě že zátěž odebírá čistě činný výkon. (1), (2)

1.1.2 Dělení podle charakteru napájecího zdroje

U dělení střídačů podle druhu napájecího obvodu rozlišujeme dva druhy střídače napět'ové a střídače proudové.

Napět'ový střídač je napájen zdrojem s malou vnitřní impedancí. Tvrdý napět'ový zdroj může mít buď konstantní anebo regulované výstupní napětí. Napět'ový zdroj je vybaven napět'ovým kondenzátorem o velké hodnotě, jakožto zdroj špičkové energie. Elektrickým zdrojem může být olovený akumulátor, sluneční baterie, magnetohydrodynamický generátor, nebo usměrňovač napájený ze střídavé sítě. Napět'ové střídače se dnes používají pro většinu střídačů v zdrojích regulovaného napětí a kmitočtu, ve záskokových zdrojích, v elektrických regulovaných střídavých pohonech, ve zdrojích pro indukční ohřevy a zdrojích kapacitního a indukčního VA výkonu. Tyto měniče jsou obsazovány dnes především vypínatelnými GTO tyristory a výkonovými tranzistory.

Proudový střídač musí být napájen zdrojem konstantního proudu. Napájecí zdroj je vybaven tlumivkou v obvodu zdroje proudu. U těchto střídačů není tvar proudu ovlivňován parametry obvodu, ale vytváří ho velká indukčnost. Má tvar konstantního bloku proudu. Proudové střídače jsou velmi namáhány napětím způsobeným přerušováním proudu v indukčnosti zátěže. Proto spínací součástky jako GTO tyristory a tranzistory doplňujeme přepět'ovými ochranami v podobě kondenzátorů s větší hodnotou. Proudové střídače využíváme obvykle pro elektrické pohony se střídavými motory, pohon kompresorů, k napájení synchronních či asynchronních ventilových motorů velkých výkonů, pro rozběhy soustrojí v přečerpávajících hydroelektrárnách, pro indukční ohřevy a další podobné stroje. (2)

1.2 Základní obvodové principy

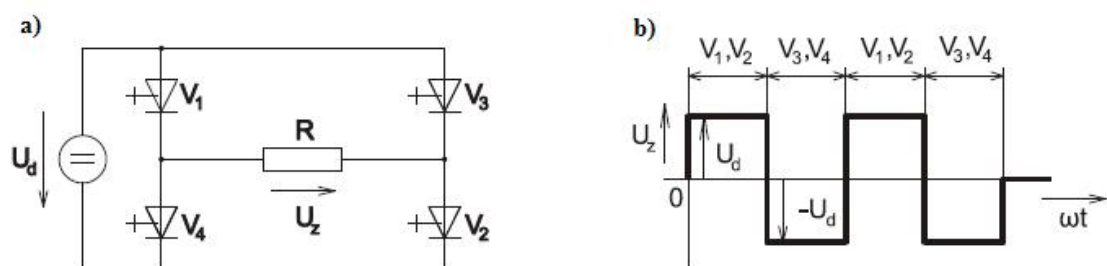
Při výkladu základních obvodových principů střídačů si pomáháme zjednodušením. Zátěž (R) je brána jako čistě činná. Zanedbáváme tedy problém přenosu jalového výkonu a problém charakteru napájecího zdroje. Všechny transformátory v obvodu bereme jako idealizované bez rozptylové indukčnosti. Kmitočet f výstupního napětí a proudu je řízen kmitočtem spínání spínacích součástek střídače. Výstupní úhlový kmitočet je

$$\omega = 2\pi f \quad (1.4)$$

průběhy výstupního napětí a proudu jsou obvykle zakreslovány v závislosti na elektrickém úhlu ωt . (1)

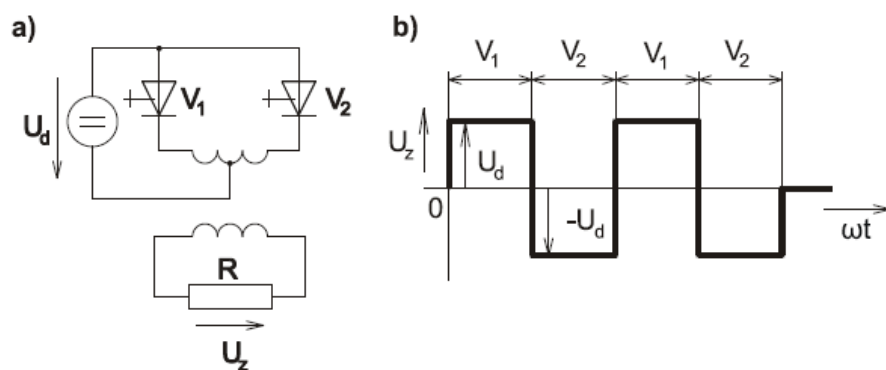
1.2.1 Jednofázová zapojení

Jednofázový střídač v můstkovém zapojení je uveden na obr. 1.2a. je složen ze čtyř vypínatelných součástek. Na obr. 1.2b vidíme průběh napětí na zátěži, z tohoto obrázku je zřejmá i posloupnost spínání jednotlivých taktů. Toto je nejpoužívanější zapojení jednofázových aplikací.



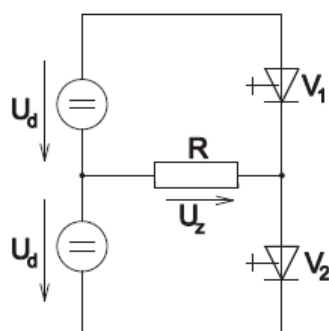
Obr. 1.2 Jednofázový střídač v můstkovém zapojení a jeho průběh napětí na zátěži (1)

Jednofázový střídač v uzlovém zapojení vidíme na obrázku 1.3a je sestaven sice jen ze dvou součástek, ale pro vytvoření střídavého napětí se neobejde bez výstupního transformátoru. Je napájen jednoduchým stejnosměrným zdrojem. Na obrázku 1.3b vidíme průběh napětí na zátěži tohoto střídače. I zde vidíme posloupnost spínání jednotlivých taktů.



Obr. 1.3 Jednofázový střídač v uzlovém zapojení a jeho průběh napětí na zátěži (1)

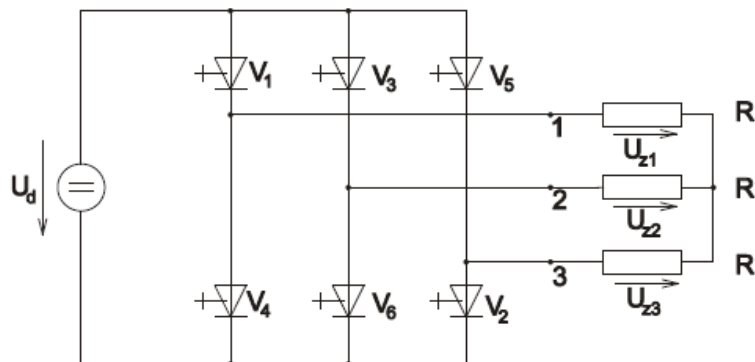
Střídač v polomůstkovém zapojení je na obrázku 1.4 má také pouze dvě vypínatelné součástky, ale musí obsahovat stejnosměrný zdroj s vyvedeným středem. Jeho průběh napětí na zátěži je shodný s uzlovým zapojením na obr. 1.3b. (3)



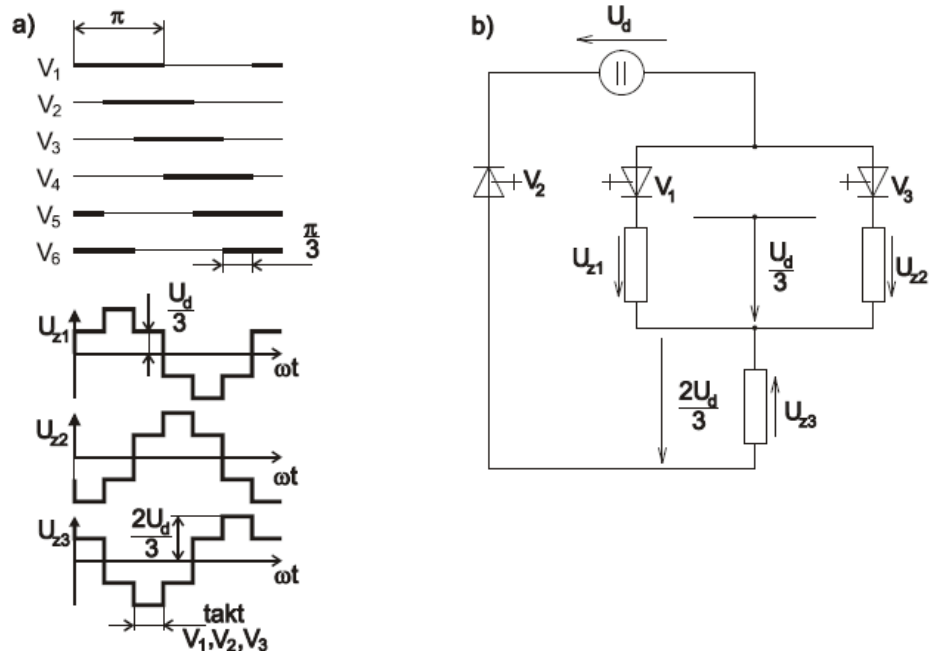
Obr. 1.4 Jednofázový střídač v polomůstkovém zapojení (1)

1.2.2 Trojfázová zapojení

Trojfázový střídač v můstkovém zapojení vidíme na obrázku 1.5. Obsahuje šest spínacích součástek. Spíná s odstupem elektrického úhlu $\pi/3$ až π . Pokud by byl úhel menší $\pi/3$ byla by sepnutá vždy jen jedna součástka a obvodem by neprocházel proud. Naopak pokud by byl elektrický úhel větší než π nastala by situace, že by byly sepnuty dvě součástky jedné fáze, (např. V1 a V4) obvod by se nacházel ve zkratu, což je nežádoucí stav. Jestliže je interval sepnutí jednotlivých součástek roven hodnotě π jsou sepnuty současně tři součástky. Na obr. 1.6a vidíme spínací diagram, kdy je elektrický uhel právě roven hodnotě π , čili vidíme vždy právě 3 sepnuté součástky. Napětí na jednotlivých fázích zátěže jde určit lehce z Ohmova zákona. Pro takt V1,V2,V3 je ukazuje obr. 1.6b. (1)



Obr. 1.5 Trojfázový střídač v můstkovém zapojení (1)



Obr. 1.6 spínací diagram trojfázového střídače pro elektrický úhel roven π a náhradní schéma pro takt V1,V2,V3 (1)

1.3 Napět'ové střídače

V této části, budeme podrobněji popisovat konkrétní střídače, které následně v praktické části této bakalářské práce nasimulujeme a doložíme výsledná schémata.

1.3.1 Průchod činného a jalového výkonu u napět'ových střídačů

Protože se budeme zabývat reálným napět'ovým střídačem, jehož zátěž není čistě odporová, ale projevuje se nám zde i indukčnost, musíme si před samotným zapojením vysvětlit průchod činného a jalového výkonu střídačem. Protože se jedná o napět'ový střídač, na místě stejnosměrného zdroje, tedy uvažujeme zdroj konstantního napětí U_d . Pakliže střední hodnota stejnosměrného proudu je I_d , tak výkon odebíraný zdroji U_d a dodávaný zátěži je

$$P = U_d I_d \quad (1.5)$$

Protože $\sin \alpha U_d$ je neproměnné, změna nastává ve smyslu přenosu jak středního výkonu, tak i smyslu I_d .

$P > 0 \Rightarrow I_d > 0 \dots$ střídačový chod

$P < 0 \Rightarrow I_d < 0 \dots$ usměrňovačový chod

Okamžitá hodnota výkonu odebíraného ze stejnosměrného zdroje je dána vztahem

$$p = U_d i_d = \sum_{n=1}^m P_n \quad (1.6)$$

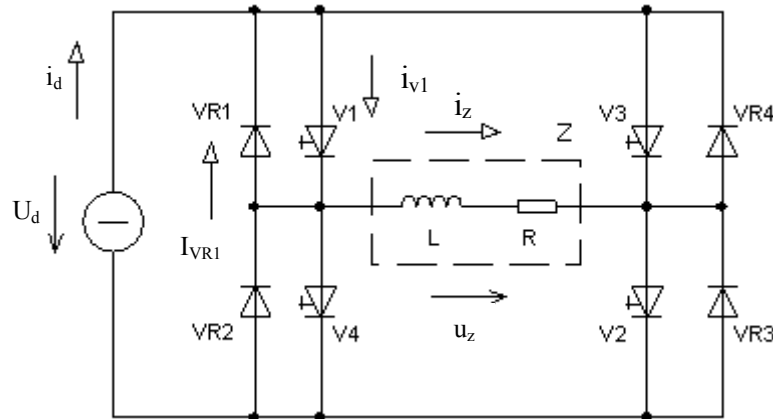
kde i_d je okamžitá hodnota proudu ve stejnosměrném obvodu a p_n je okamžitá hodnota výkonu odebíraného n -tou fází m -fázové zátěže. V jednofázovém střídači je odběr jalového výkonu zátěží způsoben periodickými změnami smyslu i_d . U střídače m -fázového může odběrem jalového výkonu nastat změna smyslu i_d , ale častěji dochází v závislosti na velikosti jalového výkonu jen ke většímu či menšímu zvlnění tohoto proudu.

Kvůli výše zmíněnému výkladu vyplývá, že stejnosměrná strana střídače musí umožňovat průchod proudu v obou směrech. Prakticky průchod $i_d > 0$ zajišťují vypínatelné součástky značeny obvykle V a průchod $i_d < 0$ umožňují tzv. zpětné diody označovány VR, které jsou připojeny antiparalelně ke každé vypínatelné součástce napět'ového střídače, jak můžeme vidět například na našem obr. 1.7. Jako celek tvoří zpětné diody tzv. zpětný usměrňovač, který umožňuje usměrňovačový chod a odběr jalového výkonu zátěží. Nutno jen dodat, že změna polarity na stejnosměrných svorkách střídače je nepřipustná. (3)

1.3.2 Jednofázový napět'ový střídač v můstkovém zapojení

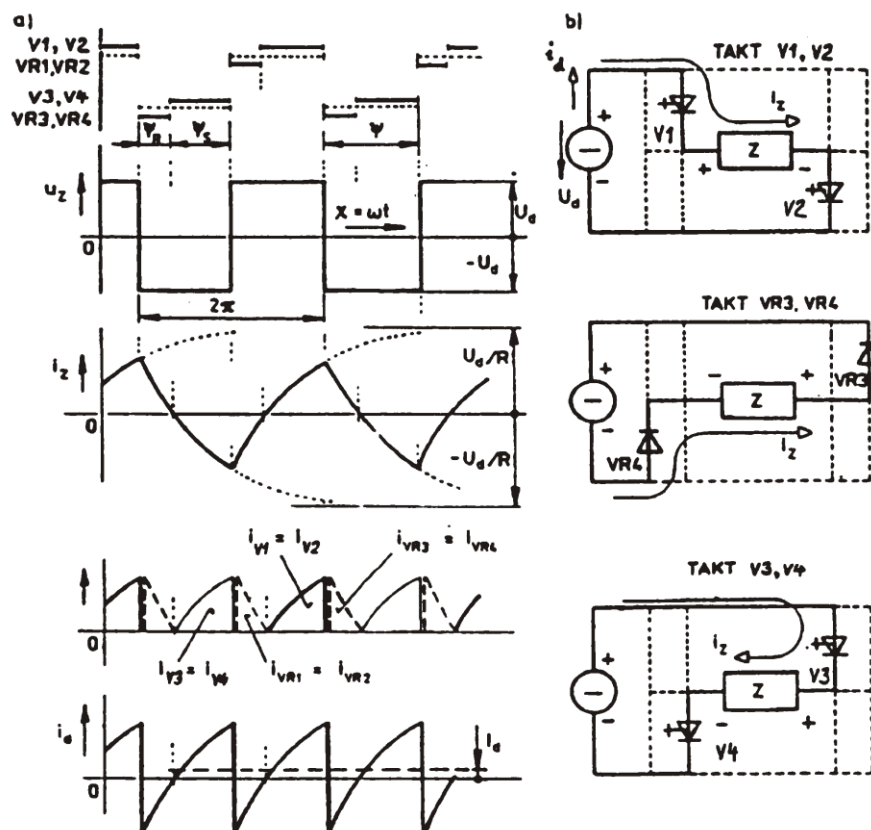
Na úvod tohoto střídače bych jen dodal, že se jedná o obdélníkově řízený střídač. Co to prakticky znamená, probereme v dalších částech.

Schéma vidíme na obr. 1.7. Vidíme v něm čtyři vypínatelné součástky tvořené tyristory (ale můžou být použiti i tranzistory) a čtyři zpětné diody, které tvoří již dříve zmíněný zpětný usměrňovač. Zátěž v tomto zapojení uvažujeme R, L.



Obr. 1.7 Schéma jednofázového napěťového střídače v můstkovém zapojení (1)

Proudové a napěťové poměry při $\psi = \pi$ a odpovídající spínací diagram vidíme na obr. 1.8a. Úhel ψ je interval sepnutí jednotlivých součástek (interval mezi začátkem a koncem zapínacího impulsu vysílaného na součástku) a nazývá se programový úhel, ale také mu říkáme úhel sepnutí. Ve spínacích diagramech jsou vyznačeny tyto intervaly tečkovanou čarou. Nad touto čarou vidíme (plnou čarou) interval sepnutí vypínatelných součástek a pod touto čarou (opět plnou čarou) vidíme interval sepnutí zpětných diod. Dále vidíme na obr. 1.8a skutečný úhel sepnutí polovodičových spínačů ψ_s a nachází se zde i úhel (interval) sepnutí zpětných diod ψ_R , který závisí na charakteru zátěže. Při čistě odporové zátěži je $\psi_R = 0$. Při R, L zátěži je $0 < \psi_R < \pi/2$. Při usměrňovačovém chodu zátěže zase $\psi_R > \pi/2$. Významy těchto úhlů platí pro všechny napěťové střídače. Regulační rozsah ψ je omezen úhlem π . Pokud by bylo π větší docházelo by k zapínání součástek V1 a V4 a nebo V2 a V3 což by vedlo ke zkratu. Regulační rozsah tedy je $0 < \psi < \pi$. Pro správný chod je nezbytné vkládat mezi vypnutí jednoho a zapnutí druhého polovodičového spínače připojeného k témuž vývodu zátěže tzv. mrtvý úhel (malý časový interval). Při nedodržení by docházelo ke zkratu. Při následujícím popisu je tento úhel zanedbán tzn. Na místě $\psi \rightarrow \pi$ je přijato $\psi = \pi$.



Obr 1.8 Spínací diagram napět'ového jednofázového střídače pro proudové a napět'ové poměry při $\psi = \pi$ a stavy obvodu v jednotlivých taktech (1)

Na jednotlivých taktech si vysvětlíme fungování obvodu. Tyto takty můžeme vidět na obr 1.8b.

Takt V1, V2. Jestliže jsou sepnuty součástky V1 a V2 napětí na zátěži je rovno napětí na zdroji $u_z = U_d$. Hodnota proudu zátěže i_z exponenciálně narůstá k hodnotě U_d/R . Energie přijatá se částečně ztrácí na R a část se akumuluje v L. Takt končí vypnutím V1, V2.

Takt VR3, VR4. Po vypnutí vypínacích součástek V1 V2 proud i_z nezaniká, ale kvůli působení L pokračuje v původním smyslu přes zpětné diody VR3 a VR4. Tím se na zátěž připojí záporné napětí zdroje $u_z = -U_d$. Hodnota proudu zátěže i_z exponenciálně klesá k hodnotě $-U_d/R$. Energie přijatá v předchozím taktu indukčností L se ztrácí na R, část se vrací zpět do stejnosměrného zdroje. Takt VR3, VR4 končí poklesem i_z na nulovou hodnotu.

Takt V3, V4. Na spínacím diagramu vidíme, že v průběhu sepnutí VR3, VR4, už byl vyslán zapínací impuls na součástky V3 a V4, ty se ale nemohly zapnout, protože zpětné diody na nich držely závěrné napětí. Až v momentě kdy zanikne proud zpětných diod se součástky V3 a V4 spínají. Po sepnutí zůstává napětí na zátěži $u_z = -U_d$. Proud i_z prochází zátěží změněným smyslem a klesá k hodnotě $-U_d/R$. Energie je zátěží opět přijímána. Opět se část energie ztrácí na R a část akumuluje na L. Takt končí vypnutím V3, V4.

Takt VR1, VR2. Po vypnutí V3 a V4 pokračuje proud i_z podobně jako v taktu minulých zpětných diod, přes zpětné diody VR1 a VR2. Na zátěž tím připojujeme napětí $u_z = U_d$.

Hodnota proudu zátěže i_z exponenciálně narůstá k hodnotě U_d/R a tím se zase dostáváme k prvnímu taktu.

Proudové a napěťové poměry při $\psi < \pi$. Pomocí řízení velikosti ψ (v dříve zmíněném rozsahu $0 - \pi$) napětí na zátěži. Pokud ale řídíme úhel ψ u všech spínačů vychází nám nepříznivá křivka napětí na zátěži. Proto řídíme ψ jen u dvou spínačů a zbylé dva necháme na hodnotě $\psi = \pi$, což nám jednofázový můstek umožňuje. Spínací diagram, proudové a napěťové poměry takto řízeného střídače můžeme vidět na obr. 1.9a.

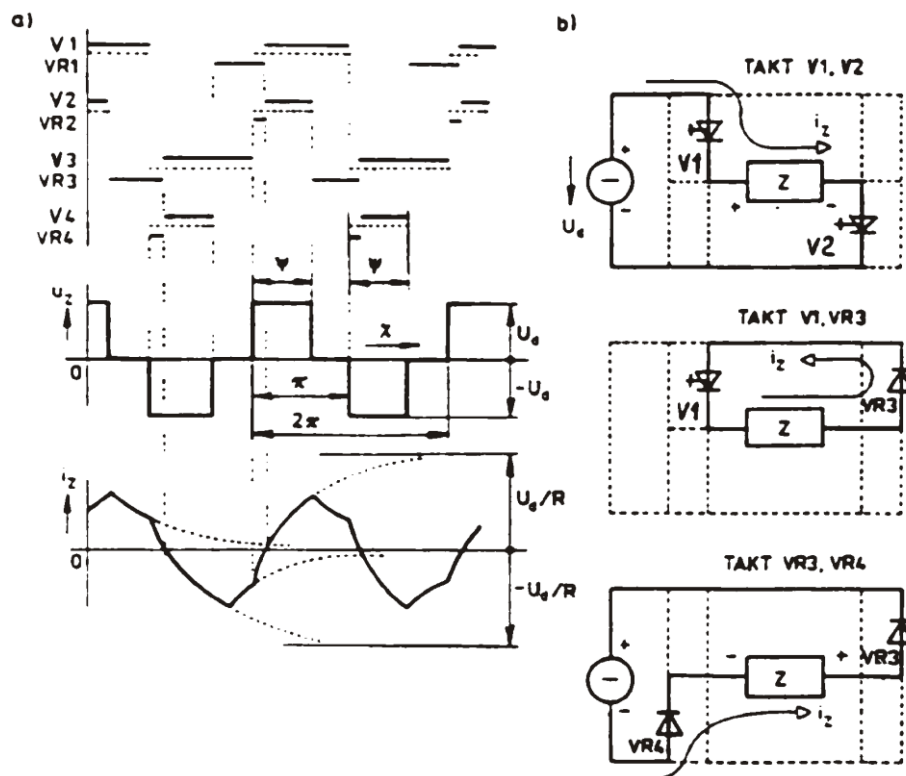
Princip chodu si opět vysvětlíme na pár taktech, které můžeme vidět na obr. 1.9b.

Takt V1, V2. Tento takt končí vypnutím (jednoho) spínače V2, jeho vypnutím se i_z uzavírá přes V1 a VR3 (jakožto další takt možný vidět na obr. 1.9). Na zátěži je nulové napětí a i_z exponenciálně k nule klesá. Teprve jestliže vypneme (druhý) spínač V1 se i_z začíná uzavírat přes zpětné diody (takt VR3, VR4). Na zátěž je znovu připojeno napětí.

Dále provedeme analýzu napětí a proudu zátěže. Z průběhů okamžitého napětí na zátěži u_z na obr. 1.9a vyplývá, že je závislý na řízené hodnotě ψ ze dvou spínačů můstku. Pokud je jako v tomto případě proud zátěže nepřerušovaný, nezávisí průběh u_z na impedanci zátěže.

Vyšší harmonické hodnoty a příslušné efektivní hodnoty průběhu u_z . Úhel $\omega t = \chi = 0$ je uvažován podle obr. 1.10. Pro efektivní hodnotu průběhu u_z vychází

$$U_z = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_z^2 dx} = U_d \sqrt{\frac{\psi}{\pi}} \quad (1.7)$$



Obr 1.9 Spínací diagram napěťového jednofázového střídače pro proudové a napěťové poměry při $\psi < \pi$ a stavy obvodu v jednotlivých taktech (1)

Průběh u_z lze vyjádřit prostřednictvím vyšších harmonických složek. S přihlédnutím, že průběh představuje lichá funkce souměrná podle osy x je

$$u_z = \sum_{n=1,2,3}^{\infty} B_{(n)} \sin nx \quad (1.8)$$

$$B_{(n)} = U_{zm(n)} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u_z \sin nx \, dx = \frac{4U_d}{\pi n} \cos \left(n \frac{\pi - \psi}{2} \right) \quad (1.9)$$

Kde $B_{(n)} = U_{zm(n)}$ je amplituda n -té harmonické.
Efektivní hodnoty jednotlivých harmonických jsou

$$U_{Z(n)} = \frac{2\sqrt{2}U_d}{\pi n} \cos \left(n \frac{\pi - \psi}{2} \right) \quad (1.10)$$

Závislost $U_{Z(n)}(\psi)$ je graficky znázorněna na obr. 1.10. Jednotlivé harmonické složky proudu jsou určeny příslušnými harmonickými napětí a impedancemi $Z_{(n)}$ pro příslušné harmonické. Průběh i_z pak lze opět vyjádřit prostřednictvím vyšších harmonických

$$i_z = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{U_{zm(n)}}{Z_{(n)}} \sin (nx + \varphi_{(n)}) \quad (1.11)$$

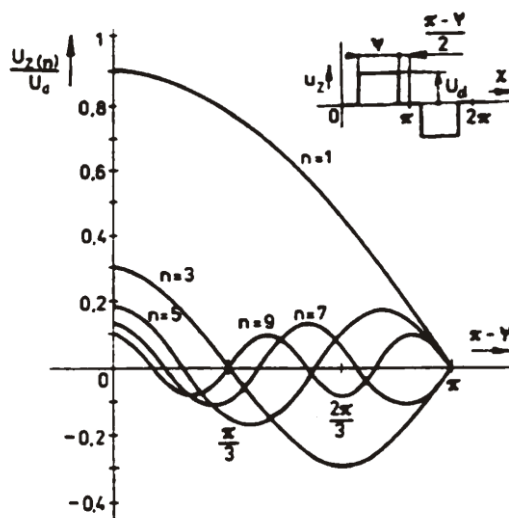
Kde $\varphi_{(n)}$ je fázový posuv n -té harmonické proudu k uvažovanému $x=0$. Při standardní zátěži s indukčností narůstá $Z_{(n)}$ s nárůstem n . Efektivní hodnoty harmonických proudů

$I_{zm(n)} = U_{zm(n)} / \sqrt{2} Z_{(n)}$ proto klesají s rostoucím n rychleji než napětí. Při určování výstupního výkonu na střídavé straně se proto zpravidla respektují jen první harmonické. (1) (2) (3)

$$P \doteq P_{(1)} = U_{Z(1)} I_{Z(1)} \cos \varphi_{(1)} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_d I_{Z(1)} \cos \varphi_{(1)} \cos \frac{\pi - \psi}{2} \quad (1.12)$$

Protože obecně platí vztah $P = U_d I_d$, vychází

$$I_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{Z(1)} \cos \varphi_{(1)} \cos \frac{\pi - \psi}{2} \quad (1.13)$$

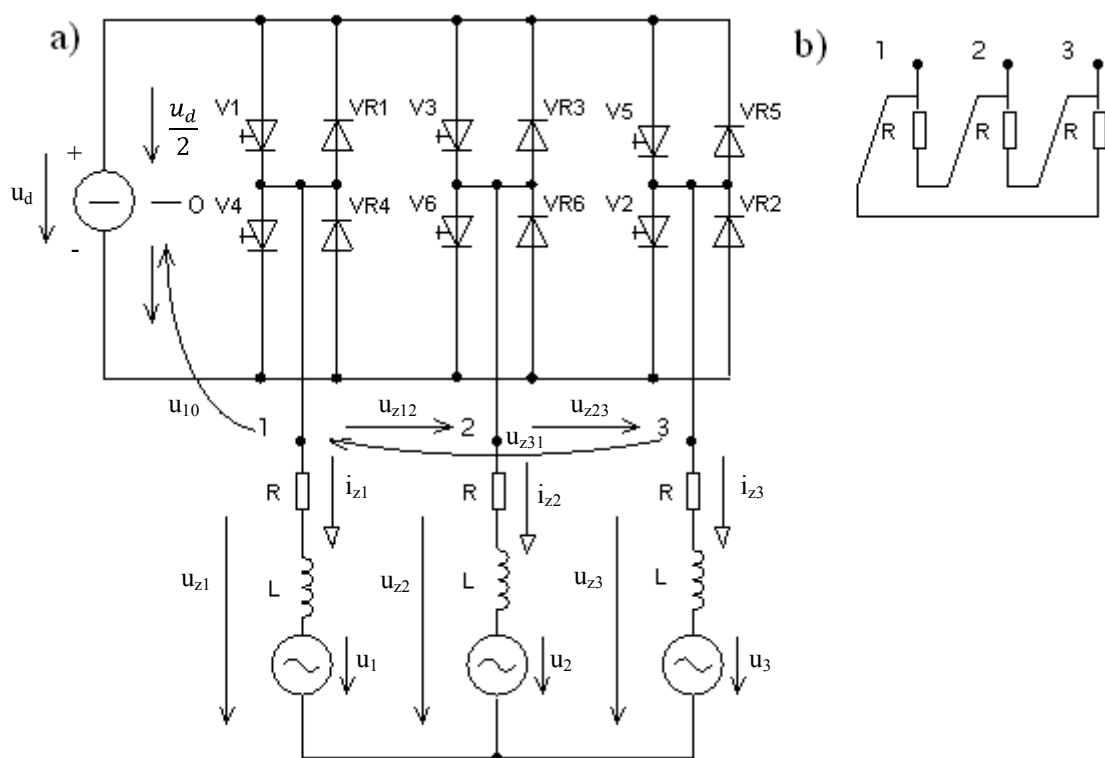


Obr. 1.10 Napětí na zátěž jednofázového střídače z obr 1.7 určení závislosti ef. Hodnoty na n -té harmonické $U_{z(n)}$ na úhlu ψ (1)

1.3.3 Trojfázový napěťový střídač v můstkovém zapojení

Schéma tohoto střídače můžeme vidět na obr. 1.11. Tento střídač se skládá z šesti vypínatelných součástek V1 až V6 a ke každé této vypínatelné součástce je antiparalelně připojená dioda, čili celkem šest diod VR1 až VR6. Jak vidíme na obr. 1.11a zátěž je zapojena do hvězdy. Případné zapojení do trojúhelníka vidíme na obr. 1.11b.

V následujících větách si popíšeme vztahy mezi napětími střídače, pomocí obecného postupu, kterým je možno při jakémkoli stavu sepnutí součástek určit napětí na zátěži. V závislosti na stavu sepnutí součástek, můžeme stanovit napětí výstupních střídavých vývodů střídače 1,2,3 vzhledem k pomyslnému střednímu vývodu 0 stejnosměrného zdroje to je napětí u_{10}, u_{20}, u_{30} . V dalším výkladu tato napětí nazýváme fázové napětí střídače (střídavé vývody), ale nejedná se o fázové napětí zátěže. Ze schématu na obr. 1.11a můžeme vyvodit, že je-li nějaký střídavý vývod připojen sepnutým tyristorovým spínačem, nebo sepnutou zpětnou diodou ke kladnému vývodu stejnosměrného zdroje, je napětí střídavého vývodu k pomyslnému střednímu vývodu $U_d/2$. Konkrétně pokud by šlo o vývod 1 a součástky V nebo VR1, bude platit $u_{10} = U_d/2$. Jestliže je daný vývod připojen přes součástky k zápornému stejnosměrnému napětí, je napětí na vývodu $-U_d/2$. Pokud není střídavý vývod připojen ani k jednomu vývodu stejnosměrného zdroje, je napětí nulové.



Obr 1.11 Trojfázový napěťový střídač v můstkovém zapojení se zátěží do hvězdy, případně trojúhelníka (1)

Pro sdružená napětí střídače (viz obr. 1.11) platí.

$$u_{z12} = u_{10} - u_{20} \quad (1.14)$$

$$u_{z23} = u_{20} - u_{30} \quad (1.15)$$

$$u_{z31} = u_{30} - u_{10} \quad (1.16)$$

V případě, že je zátěž zapojená do trojúhelníka jako na obr 1.11b, jsou sdružená napětí střídače stejná s fázovými napětími zátěže. Jestliže je zapojená do hvězdy obr.1.11a, platí mezi sdruženými a fázovými napětími vztahy. (Za předpokladu symetrické zátěže a lze-li předpokládat symetrické a vyvážené i odvozované napětí.)

$$u_{z12} = u_{z1} - u_{z2} \quad (1.17)$$

$$u_{z23} = u_{z2} - u_{z3} \quad (1.18)$$

$$u_{z31} = u_{z3} - u_{z1} \quad (1.19)$$

$$0 = u_{z1} + u_{z2} + u_{z3} \quad (1.20)$$

Z poslední soustavy rovnic můžeme vyjádřit fázová napětí na zátěži.

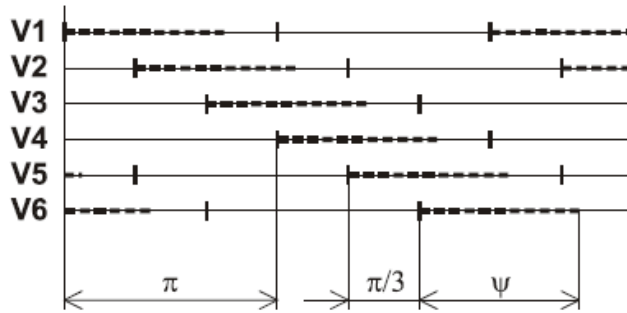
$$u_{z1} = \frac{1}{3}(u_{z12} - u_{z31}) \quad (1.21)$$

$$u_{z2} = \frac{1}{3}(u_{z23} - u_{z12}) \quad (1.22)$$

$$u_{z3} = \frac{1}{3}(u_{z31} - u_{z23}) \quad (1.23)$$

Uvedené závislosti mezi obvodovými napětími střídače a zátěže jsou obecně platné, nejen pro obdélníkové řízení.

Provozní rozsah úhlu ψ . Výklad úhlu ψ je uveden již v předchozí části jednofázového napěťového střídače. Na obr. 1.12 je uveden sled sepnutí součástek trojfázového střídače. Z kapitoly jednofázového střídače taky už víme, že ona tečkovaná čára znamená interval, kdy jsou na dané součástky vysílány zapínací impulsy (což nutně neznamená, že je součástka opravdu sepnutá). Začátky po sobě jdoucích intervalů jsou vzájemně posunuty o úhel $\pi/3$. Velikost ψ se v určitém intervalu může měnit, ale musí se dodržet u všech spínačů stejný.



Obr. 1.12 Úhly sepnutí součástek trojfázového střídače (3)

Aby se obvodem střídače mohl uzavírat proud, musí současně sepnout alespoň jeden spínač s katodové (V1, V3, V5) a jeden s anodové (V2, V4, V6) skupiny. Smysl tedy mají jen hodnoty ψ , při kterých se překrývají programové intervaly sepnutí alespoň jednoho spínače z katodové a jednoho spínače z anodové strany. Při kontrole obr. 1.12 zjistíme, že odpovídají jen hodnoty $\psi > \pi/3$. Při stavu $\psi > \pi$ pak dochází k překrytí úhlů sepnutí součástek jedné fáze. Což by mohlo vést ke zkratu a je to tedy nepřípustné. Také nesmíme při pohlížení na praktickou realizaci zapomenout na mrtvý úhel, který jsme si popsali u jednofázového napěťového střídače. Regulační rozsah úhlu sepnutí tedy vychází

$$\pi/3 < \psi < \pi \quad (1.24)$$

Protože mrtvý uhel je zanedbatelně malý, běžně se uvádí řízení od $\pi/3$ do π , s tím že při hodnotě π je napětí maximální.

Průběhy napětí na čistě činné zátěži při různých úhlech ψ je možno odvodit ze spínacího diagramu. Při využití čistě činné zátěže neuplatňujeme zpětné diody. Pro určení sdružených a fázových napětí využijeme výše uvedené rovnice. Můžeme taky postupovat, tak jak jsme si ukázali v kapitole 1.2.2. odvození průběhu napětí, které odpovídá hodnotě $\psi = \pi$. (obr. 1.6).

Průběhy sdružených a fázových napětí na zátěži pro několik vybraných hodnot ψ vidíme na obr. 1.13a. Velmi podstatnou roli hraje průběh napětí při $\psi = \pi$ (obr. 1.13a), takže si pro něj uvedeme několik důležitých parametrů. Efektivní hodnota sdruženého napětí vychází.

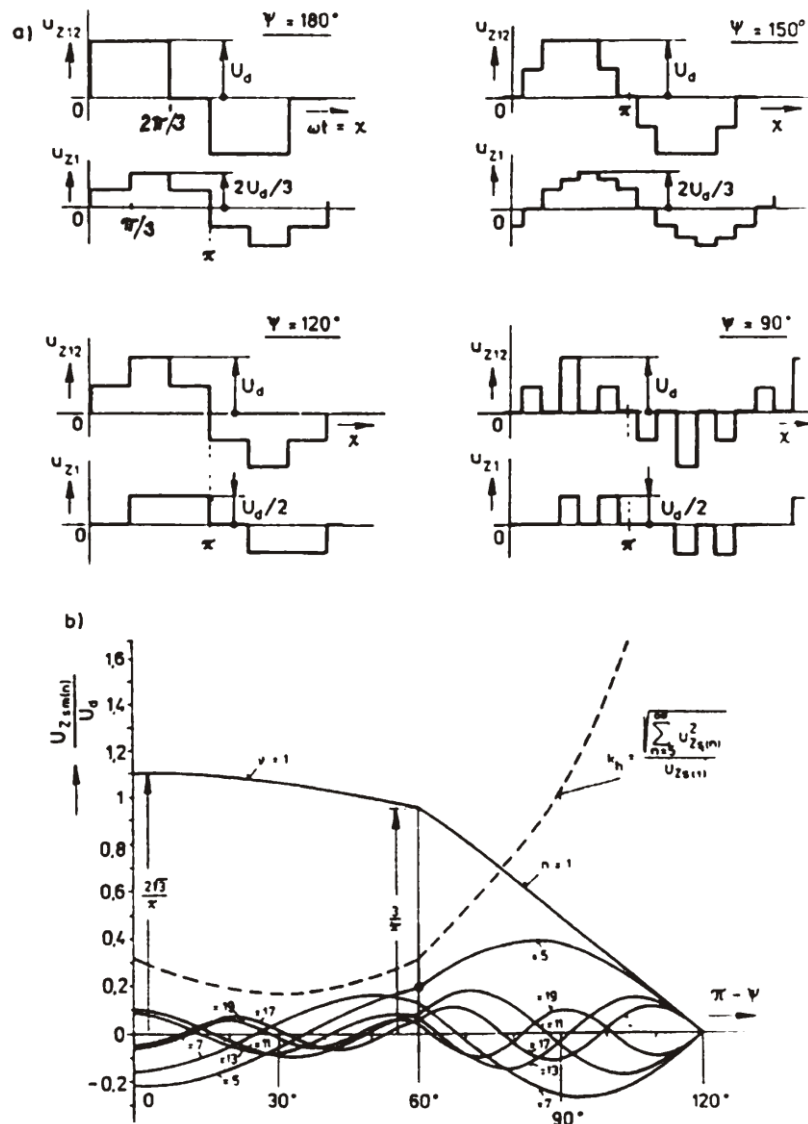
$$U_{zs} = U_d \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (1.25)$$

Průběh sdruženého napětí u_{z12} můžeme vyjádřit Furierovou řadou. Protože je funkce zobrazující u_{z12} lichá a souměrná podle osy x , platí

$$u_{z12} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} B_n \sin\left(nx + \frac{\pi}{6}\right) \quad (1.26)$$

$$B_{(n)} = U_{zm(n)} = \frac{4U_d}{\pi n} \cos n \frac{\pi}{6}, n = 1, 3, 5 \dots \quad (1.27)$$

Kde $U_{zm(n)}$ je amplituda n -té harmonické sdruženého napětí



Obr. 1.13 Napětí na zátěži R trojfázového střídače z obr. 1.11 průběhy sdružených a fázových napětí při různých úhlech ψ a závislost amplitudy n -té harmonické sdruženého napětí $U_{zsm(n)}$ a činitele vyšších harmonických k_n na úhlu ψ (1)

Pro amplitudu 1. harmonické sdruženého napětí pak máme

$$U_{ZSm(1)} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_d = 1,103 U_d \quad (1.28)$$

Pro efektivní hodnotu fázového napětí pak vychází

$$U_Z = \frac{\sqrt{2}}{3} U_d \quad (1.29)$$

Průběh fázového napětí zátěže u_{Z1} lze vyjádřit řadou (lichá funkce souměrná podle osy x)

$$u_{Z1} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} B_n \sin nx \quad (1.30)$$

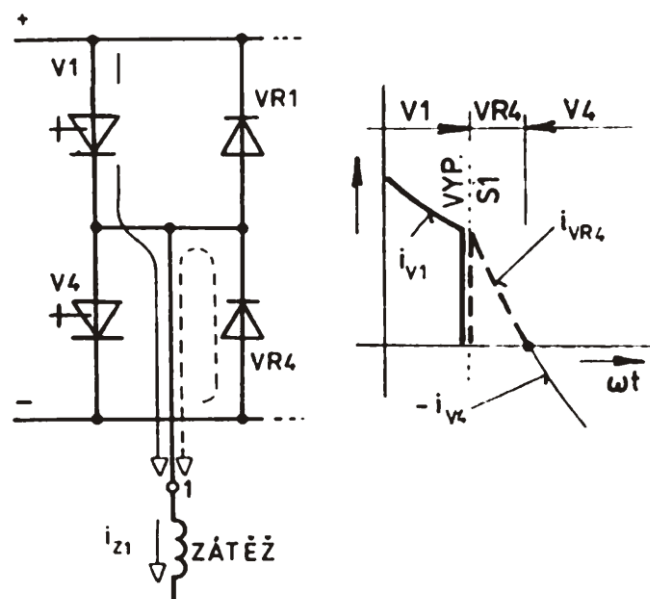
$$B_{(n)} = U_{Zm(n)} = \frac{4U_d}{3\pi n} \left(1 + \cos \frac{n\pi}{3} \right), n = 1, 3, 5 \dots \quad (1.31)$$

Amplituda 1. harmonické fázového napětí zátěže je

$$U_{Zm} = \frac{2}{\pi} U_d = 0,637 U_d \quad (1.32)$$

Při zmenšování úhlu ψ pod hodnotu π se napětí na zátěži zmenšuje, jak vidíme pro křivce $n=1$ na obr. 1.13b. Můžeme sledovat, že do hodnoty $\psi = 2\pi/3$ nastává jen nepatrný pokles. Po překročení této hranice nastává už pokles rychlejší, ale velice narůstá činitel k_h , což je pro nás nepřijatelné. Z toho můžeme vyvodit závěr, že řízení úhlu ψ není výhodné. Setkáváme se tedy jen s provozem $\psi = \pi$, na který se přechází z šířkově pulzního anebo pulzně modulovaného při požadavku na maximální napětí na zátěži.

Spínání zpětných diod nastává při použití reálných typech zátěží vlivem indukčnosti. Na obr. 1.14 můžeme sledovat poměry po vypnutí spínače V1, přes který se nám před vypnutím uzavírá proud jedné fáze zátěže (plně vyznačená šipka). Jak můžeme sledovat na obrázku je zřejmé, že po vypnutí součástky V1 musí začít vést zpětná dioda VR4 (čárkovaná šipka), protože ta jediná umožňuje, aby proud ve sledované fázi dozněl v původním smyslu. Toto pravidlo platí i pro všechny ostatní součástky, jako například spínací součástku V4 a zpětnou diodu VR. Doby vodivosti zpětných diod závisí na parametrech zátěže. Sepnutá zpětná dioda VR4 udržuje na antiparalelně připojené spínací součástce V4 závěrné napětí. Daný spínač jak jsme již uváděli v jednofázového napětíového střídače, může sepnout i když na něj přivádíme zapínací impuls, až v momentě kdy dojde k poklesu proudu zpětné diody a tedy i příslušné fáze zátěže k nule. Přes sepnutý spínač se pak uzavírá proud fází zátěže v opačném smyslu, jak vidíme při i_{V4} na obr. 1.14. (1) (3)



Obr. 1.14 Spínání zpětných diod (1)

1.4 Proudové střídače

Stejnoseměrný zdroj v proudových střídačích má charakter zdroje proudu. Jako tento zdroj proudu se nejčastěji používá řízený usměrňovač. Tento usměrňovač je svou stejnosměrnou stranou připojen ke stejnosměrné straně střídače přes tlumivku, která je schopna udržet konstantní proud v intervalech srovnatelných s jedním anebo více takty střídače. Dělá tak bez ohledu na obvod, kterým se proud po vstupu do střídače protlačuje. Tím splňuje stejnosměrný obvod požadovanou podmínku a nabývá charakter zdroje proudu. Velikost proudu můžeme ovládat pomocí zmíněného usměrňovače, který bývá vybaven proudovou regulační smyčkou.

Na místě střídače nejčastěji používáme můstkové spojení. S trojfázovým můstkovým spojením proudového střídače se setkáme nejčastěji, protože proudové střídače zpravidla využíváme nejvíce v součinnosti s trojfázovými střídavými stroji. (1)

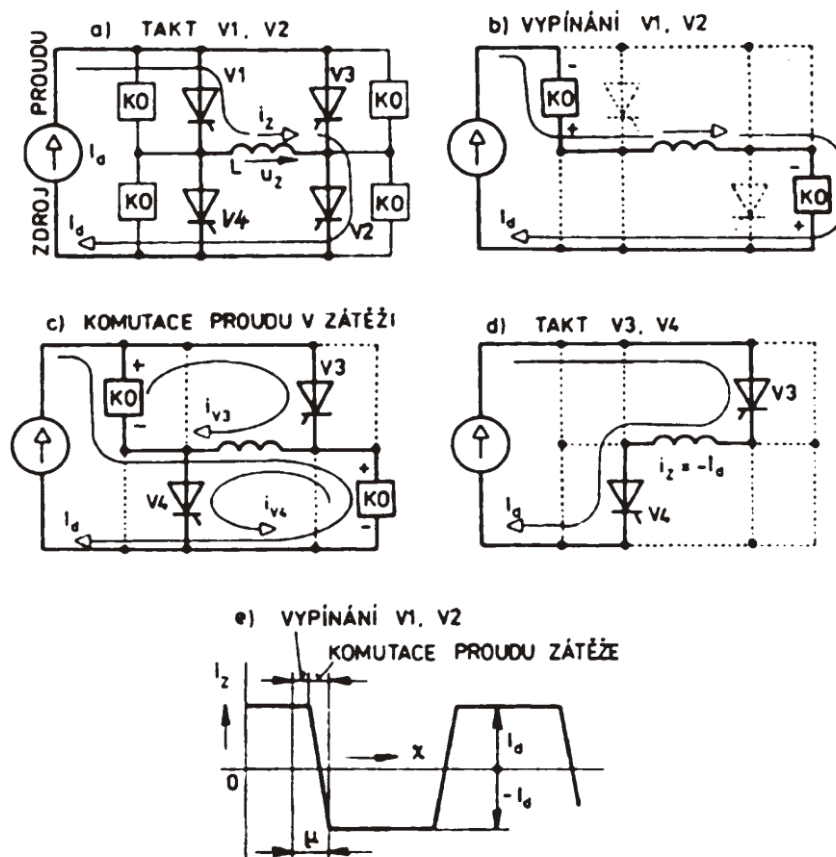
1.4.1 Komutační obvod proudového střídače

Komutační obvod proudového střídače má dvě funkce. Proudovému střídači je zdrojem proudu, tedy stejnosměrným obvodem nucen proud s neproměnným smyslem a s velikostí, která se může měnit jen v časových úsecích řádově větších, než jsou doby komutace hlavních větví měniče, proto při spínání součástí střídače musí komutační obvod plnit dvě důležité funkce:

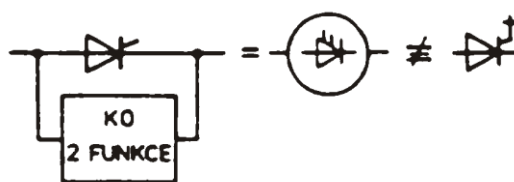
1. Vypínací
2. Akumulační (komutace proudu v zátěži)

Při plnění funkce vypínací musí komutační obvod zajistit thyristorům všechny podmínky pro vypnutí. Při plnění funkce akumulace, musí komutační obvod zajistit umožnění spojitého průběhu proudu, jak stejnosměrným, tak střídavým obvodem, při všech spínáních střídače a také musí vytvářením vhodných napěťových poměrů na zátěži zajišťovat změnu smyslu proudu v zátěži. Myšleno přechody z kladné půlveiny proudu do záporné a naopak.

Výklad komutace s cílem specifikovat úlohu, si ukážeme na příkladu jednofázového proudového střídače, který má za úkol vytvářet střídavý proud obdélníkového průběhu, který vidíme na obr. 1.15e. Schéma tohoto střídače vidíme na obr. 1.15a. Komutační obvody zde znázorňujeme pouze jako bloky. Na obrázcích 1.15a až 1.15d vidíme znázorněny určité takty obvodu při komutaci proudu z hlavních tyristorů V1 a V2 na hlavní tyristory V3 a V4. Obrázky, které znázorňují komutační takty, mají vyznačenou polaritu napětí na svorkách komutačních obvodů. Na obr. 1.15a vidíme vyznačenou cestu proudu zátěže v bezkomutačním taktu V1, V2. Obr. 1.15b zase znázorňuje vypínání hlavních tyristorů V1 a V2 komutačními obvody. Vypnutím V1 a V2 ale úloha komutačních obvodů nekončí, musí totiž ještě zajistit změnu (komutaci) proudu v zátěži, která odpovídá sepnutí hlavních tyristorů V3 a V4. Tento takt (komutace proudu zátěže) znázorňuje obr. 1.15c. Následující stav je zobrazen na obr. 1.15d. Celý interval této komutace je na obr.1.15e vyznačen jako úhel μ . To že klopné obvody proudového střídače musí plnit tyto dvě funkce, má za následek to, že hlavní tyristory a jejich příslušné klopné obvody nemůžeme nahradit vypínacími tyristory nebo tranzistory. Proto se pro tyristor vybavený klopnými obvody se dvěma funkcemi používá jiná značka, než pro obyčejný tyristorový spínač. Tuto značku můžeme vidět na obr. 1.16. (1)



Obr. 1.15 Jednofázový proudový střídač, a) až d) průběh komutace, e) proud zátěže (1)



Obr. 1.16. Značka pro tyristor vybavený KO se dvěma funkcemi (1)

1.4.2 Průchod činného a jalového výkonu u proudových střídačů

Na obr. 1.17 vidíme zjednodušené schéma proudového střídače. Víme, že střední hodnota výkonu odebíraného střídavou zátěží je

$$P = U_d I_d \quad (1.33)$$

Protože $\text{sng} I_d$ je neproměnné, změna ve smyslu přenosu výkonu nastává jen se změnou $\text{sng} U_d$.

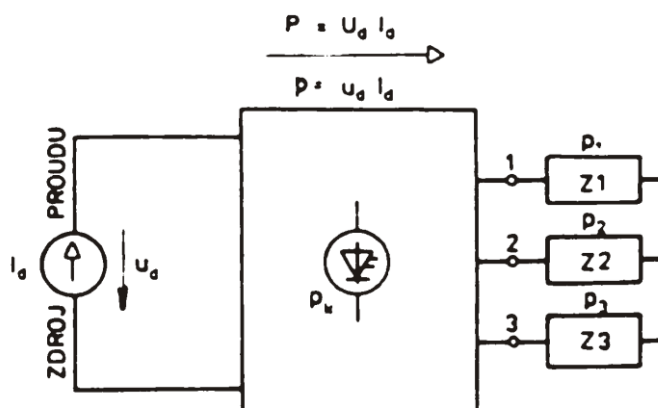
$P > 0 \Rightarrow I_d > 0 \dots$ střídačový chod

$P < 0 \Rightarrow I_d < 0 \dots$ usměrňovačový chod

Okamžitá hodnota výkonu odebíraného ze stejnosměrného zdroje je dána vztahem

$$p = U_d i_d = p_k + \sum_{n=1}^m P_n \quad (1.34)$$

kde p_k je okamžitá hodnota výkonu, které odebírají komutační obvody a ve stejnosměrném obvodu a p_n je okamžitá hodnota výkonu odebíraného n -tou fází m -fázové zátěže. V důsledku spotřeby jalového výkonu v zátěži se periodicky mění hodnota p_n mezi kladnou a zápornou. Hodnota p_k v případě zanedbání ztrát v klopných obvodech je běžně čistě střídavá, ovšem velikost hodnoty p_k souvisí s velikostí indukčnosti zátěže. Ze vztahu (1.34) poté vyplívá, že $\text{sng} p$ musí být při neproměnném $\text{sng} I_d$ totožné s $\text{sng} U_d$.



Obr. 1.17 Zjednodušené schéma proudového střídače (1)

U jednofázových střídačů se i malý odběr jalového výkonu zátěží projevuje periodickými změnami u_d . U vícefázových (m- fázových) střídačů se $\text{sn}g p = p_k + \sum P_n$ při malém odběru měnit nemusí, protože intervaly, v kterých jsou $\text{sn}g$ jednotlivých P_n rozdílná od $\text{sn}g P$ se nepřekrývají. Z toho vyplývá, že k periodickým změnám $\text{sn}g p$ a tím pádem taky u_d , dochází až při větších odběrech jalového výkonu. Menší odběr má za následek pouze zvetšení zvlnění průběhu u_d .

Dále si povíme něco o výstupním proudu a výstupním napětím. Víme, že u proudových střídačů se střídavou zátěží je vnucována křivka střídavého proudu. Proudů vnucovanému zátěží se tedy přizpůsobuje její napětí. Z hlediska tvaru výstupního proudu střídače, tedy z hlediska řízení rozlišujeme střídače.

1. s obdélníkovým řízením
2. s pulsně modulovaným řízením.

Obdélníkové řízení se využívá hlavně pro méně náročné aplikace. Jeho největší použití bylo hlavně v době vývoje proudových střídačů. Při napájení střídavého motoru z proudového střídače s obdélníkovým řízením máme obdobné potíže jako u střídačů napěťových. Dokonce se zde výrazněji projeví pulzace momentu motoru. Zejména kvůli těmto komplikacím byly vyvinuty střídače s pulsně modulovaným řízením, u kterých se křivka výstupního proudu velice blíží harmonickému průběhu. (1) (3)

1.4.3 Analýza při obdélníkovém řízení

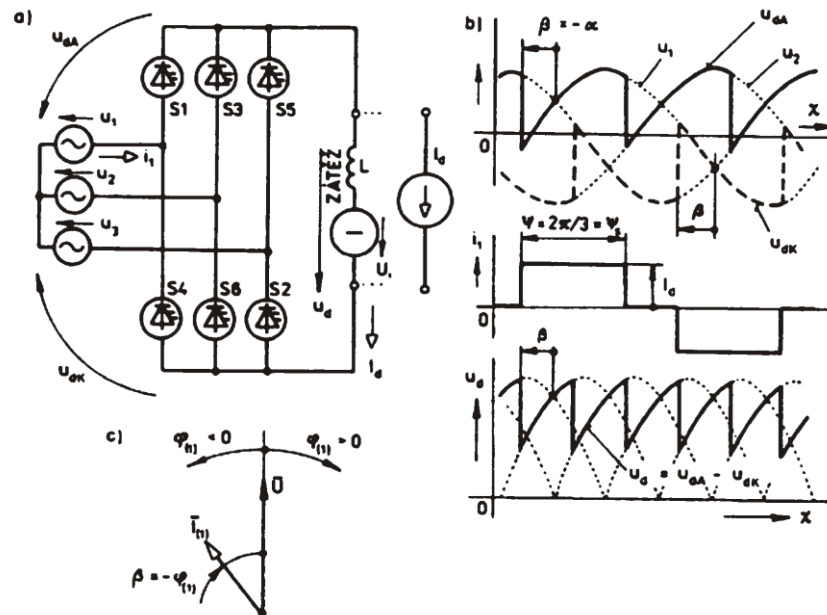
Tato kapitola by se také mohla jmenovat analogie s usměrňovačem, protože již v úvodu této práce v kapitole 1. o střídačích se zmiňujeme, že usměrňovač a střídač s vnější komutací může být jeden a tentýž měnič. O tom jaký termín bude použit, rozhoduje, až zda pracuje převážně v usměrňovačovém a nebo střídačovém chodu. Při vnější komutaci může usměrňovač (obecně měnič) pracovat jen s úhlem zpoždění komutace α v rozsahu $0 \leq \alpha \leq \pi - \gamma$, když zavedeme vlastní komutaci je možný provoz i s úhlem předstihu komutace. To znamená se záporným α ($-\pi - \gamma \leq \alpha \leq 0$). Úhel předstihu komutace označujeme β , takže $\beta = -\alpha$. Běžný stejnosměrný obvod usměrňovače, vykazuje známky zdroje proudu, protože obsahuje poměrně velkou vyhlazující indukčnost, což jsou stejné požadavky na klopné obvody jako u proudového střídače. Komutační obvod musí mít obě zmíněné funkce (vypínací a akumulací), jak je zmíněno v předchozím výkladu. Jelikož spojení hlavních tyristorů usměrňovače a proudového střídače mohou být stejná (např. trojfázový můstek), můžeme očekávat, že usměrňovač vybaven komutačními obvody s dvojí funkcí, může být z hlediska řešení výkonového obvodu měniče stejný s proudovým střídačem.

Dále se podrobněji podíváme na poměry u usměrňovače s vnější komutací a proudového střídače.

Usměrňovač s vlastní komutací můžeme vidět na obr. 1.18a. Jeho napěťové a proudové poměry při určitém úhlu předstihu komutace β , vidíme na obr. 1.18b. Komutaci na obrázku pro zjednodušení považujeme za okamžitou s tím, že vliv vnitřní impedance střídavého zdroje je zanedbatelný. Z uvedených průběhů můžeme vyčíst, že pro ideální střední hodnotu napětí na zátěži platí analogický vztah jako pro usměrňovač s vnější komutací čili,

$$U_{di} = U_{dio} \cos \beta \quad (1.35)$$

kde U_{di} je střední hodnota napětí při $\beta = 0 = \alpha$.

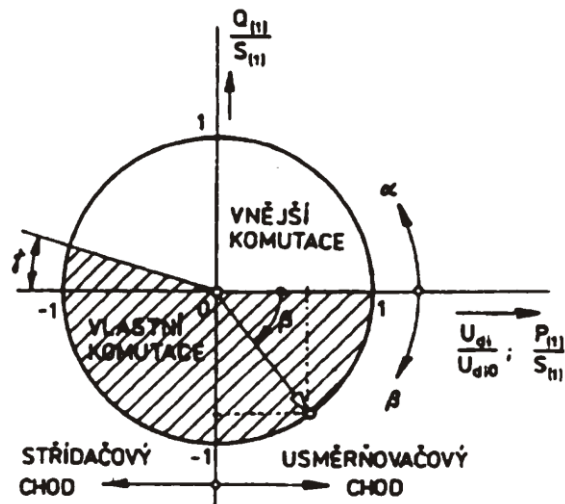


Obr. 1.18 Trojfázový usměrňovač s vlastní komutací, a) schéma, b) proudové a napěťové poměry, c) fázorový diagram střídavého zdroje. (3)

Podle obr. 1.18 můžeme taky usoudit, že úhel β je totožný s úhlem předstihu 1. Harmonické střídavého proudu před napětím

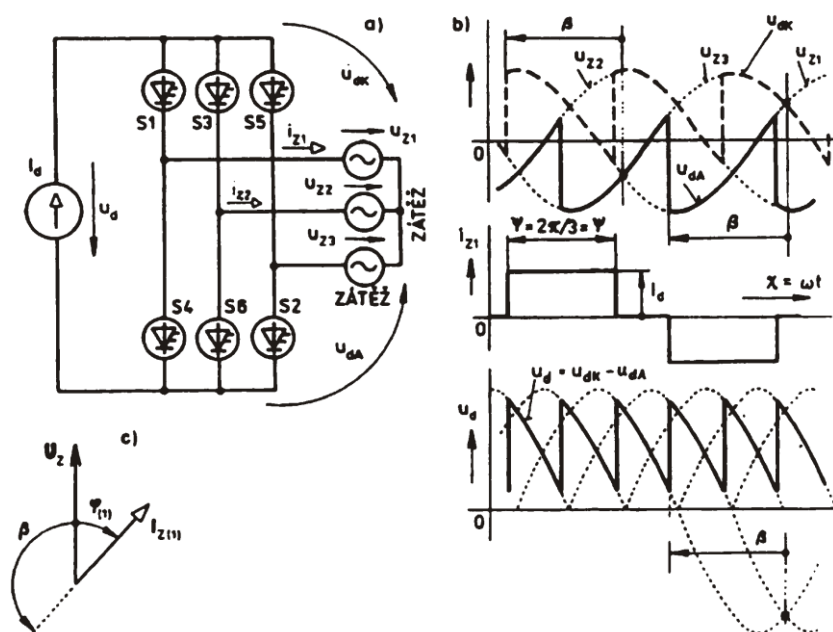
$$\beta = -\alpha = -\varphi_{(1)} \quad (1.36)$$

V souladu s tím je na obr. 1.18c zakreslen příslušný fázorový diagram střídavého zdroje. Na obr. 1.19 je poté vypočten úplný kruhový diagram usměrňovače.



Obr. 1.19 Úplný kruhový diagram usměrňovače

Z uvedených diagramů vyplývá význam vlastní komutace usměrňovače. Řídí-li se napětí na stejnosměrné zátěži s úhlem předstihu komutace β , působí usměrňovač jako kompenzátor. Proudový střídač, který můžeme vidět na obrázku 1.20a se svoji strukturou nijak neliší od usměrňovače s vlastní komutací (1.18a). Pouze úprava na obr. 1.20a při volbě kladných smyslů napětí a proudu, což naznačuje, že na stejnosměrné straně je zdroj (např. řízený usměrňovač připojený ke střídači přes tlumivku) a na střídavé straně zátěž. Pod tvarem uvedeným ve sledovaném schématu na místě zátěže, můžeme přijmout například idealizovaný synchronní motor. Proudové a napěťové poměry soustavy vidíme na obr. 1.20b a příslušný fázorový diagram střídavé zátěže, vidíme na obr. 1.20c.



Obr1.20 Trojfázový proudový střídač zatížený idealizovaným synchronním motorem, a) schéma, b) proudové a napěťové poměry, c) fázorový diagram zátěže. (3)

Nyní můžeme srovnat rozdíly mezi usměrňovačem a střídačem. U usměrňovačů je normálně určen kmitočet střídavou napájecí sítí. Napětí na stejnosměrné zátěži se mění řízením usměrňovače a to konkrétně změnami β (nebo α). U proudového střídače se řízením samotného střídače ovládá kmitočet na střídavé zátěži. Napětí na zátěži u proudových střídačů měníme řízením stejnosměrného zdroje (amplitudové řízení). Úhel β (nebo α) zde vychází jako funkce provozního stavu zátěže. Jestliže je první harmonická proudu zátěže zpožděna za napětím (za jeho první harmonickou) o úhel $\varphi_{(1)}$ jak můžeme pozorovat na obr. 1.20 b) a c), pak platí

$$\beta = -\alpha = \pi - \varphi_{(1)} \quad (1.37)$$

Pro střední hodnotu napětí na stejnosměrných svorkách platí vztah (1.35). Musíme si ale uvědomit, že v souladu s označením kladného smyslu napětí na stejnosměrných svorkách střídače (obr. 1.20), Pak vychází $U_{dio} < 0$.

Zbývá pouze dodat, že existují i takové způsoby řízení střídačů, při kterých můžeme úhel β ovládat (vektorově orientovaný způsob řízení indukčních a synchronních motorů), pomocí vhodného využití pomocí vhodných zpětných vazeb vedených od zátěže.

Jako poslední si řekneme něco o intervalech sepnutí hlavních tyristorů proudového střídače při obdélníkovém řízení. Zanedbáme-li intervaly, v nichž působí klopné obvody, uzavírá se proud proudovým střídačem v můstkovém zapojení vždy jedním s hlavním tyristorem. Z anodové skupiny a jedním hlavním tyristorem z katodové skupiny. Za předpokladu pravidelného střídání hlavních tyristorů ve vedení proudu a za předpokladu, že proud je nepřerušovaný, vychází intervaly sepnutí hlavních tyristorů $\psi_S = 2\pi/3$ u trojfázového můstku a $\psi_S = \pi$ u můstku jednofázového. Tyto intervaly jsou neřiditelné na rozdíl od střídačů napěťových, kde možnost řídit máme. To z toho důvodu, že proudový střídač nemá zpětné diody, tudíž jsou skutečné a programové intervaly sepnutí stejné. (1) (3)

2 Střídavé měniče

Střídavé měniče jsou velkou třídou měničů. Jedná se o měniče, které mají na obou stranách střídavou složku. Dělíme je na dvě základní skupiny, střídavé měniče kmitočtu a střídavé měniče napětí.

2.1 Měniče kmitočtu

Měniče kmitočtu slouží k přeměně střídavé energie jednoho kmitočtu na střídavou energii jiného kmitočtu. Mají široké pole působnosti. Můžeme je najít jako součást střídavých regulovaných pohonů a to, jak s asynchronními tak i synchronními motory. Tyto měniče umožňují jejich rozběh bez proudového nárazu na síť a řízení jejich otáček v požadovaném pracovním pásmu otáček. Umožňují nám realizovat pohony s extrémně nízkými otáčkami (cca. Několik otáček za minutu), ale i extrémně vysokými otáčkami (cca. Desítky až stovky tisíc otáček za minutu). Další významnou sekcí, kde přispívají měniče kmitočtu je indukční ohřev, kde se využívají frekvence řádově sta až tisíce Hz a výkony stovky kW. Měniče kmitočtu s výstupní frekvencí jednotky až desítky Hz, slouží k indukčnímu míchání taveniny v elektrických pecích. V energetice měniče kmitočtu našly také uplatnění například při spojení nesynchronizované střídavé sítě v Japonsku (50 a 60 Hz). Tyto měniče umožňují v řadě aplikací s usměrňovači, snížit podstatně hmotnost vstupního isolačního transformátoru takovým způsobem, že tento transformátor je napájen z měniče kmitočtu s výstupní frekvencí několika tisíc Hz.

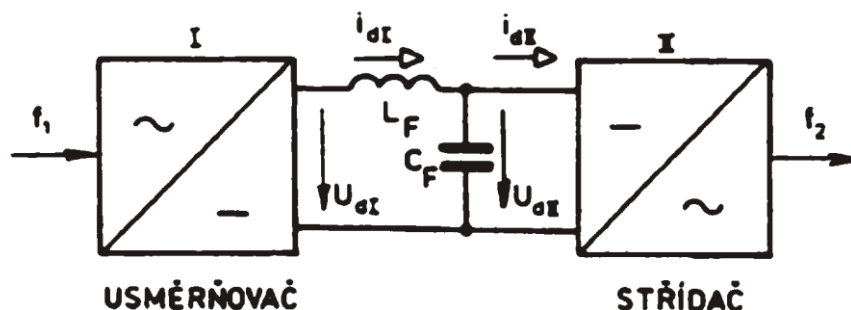
Spolu s řízením frekvence, se mnohdy požaduje současné řízení výstupního napětí, případně i změna počtu výstupních fází.

Měniče kmitočtu dělíme do dvou základních skupin a to přímé měniče kmitočtu a nepřímé měniče kmitočtu. Přímý měnič frekvence mění vstupní frekvenci na výstupní frekvenci přímo a nelze v něm nalézt stejnosměrný mezi-obvod, který naopak vidíme u nepřímého měniče kmitočtu. Ten je sestaven s dvou polovodičových měničů. Jedná se o usměrňovač, který mění vstupní střídavou energii na stejnosměrnou a střídač, který tuto stejnosměrnou energii mění zpátky na výstupní střídavou energii požadované frekvence. (2)

2.1.1 Nepřímé měniče kmitočtu

Nepřímý měnič kmitočtu, jak už bylo nastíněno, se skládá z usměrňovače, který je zpravidla připojen přes transformátor na rozvodnou síť. Usměrňovač nejprve vstupní střídavé napětí a střídavý proud o vstupním (síťovém) kmitočtu usměrní. Následuje střídač, který usměrněné napětí a proud zase rozstřídá na požadovaný kmitočet. Stejnosemerný obvod plní roli oddělení dvou střídavých obvodů, (vstupní a výstupní). Umožňujeme tím řízení výstupního kmitočtu zcela nezávisle na kmitočtu vstupním. Nepřímé měniče kmitočtu běžně pracují s výstupními kmitočty od nuly až do stovek Hz. Mezní hodnoty jsou okolo jednotek MW. U elektrotepelné techniky mohou kmitočty dosahovat hodnot až desítky kHz.

Kvůli nepřesáhnutí rozsahu bakalářské práce nebudeme simulovat žádné měniče kmitočtu a zmiňujeme je pouze pro úplnost daného členění. Ukážeme si alespoň tedy ukázkou základního uspořádání nepřímého měniče kmitočtu s napět'ovým střídačem, který můžeme vidět na obr. 2. 1.



Obr. 2.1 Základní uspořádání nepřímého měniče kmitočtu s napět'ovým střídačem (1)

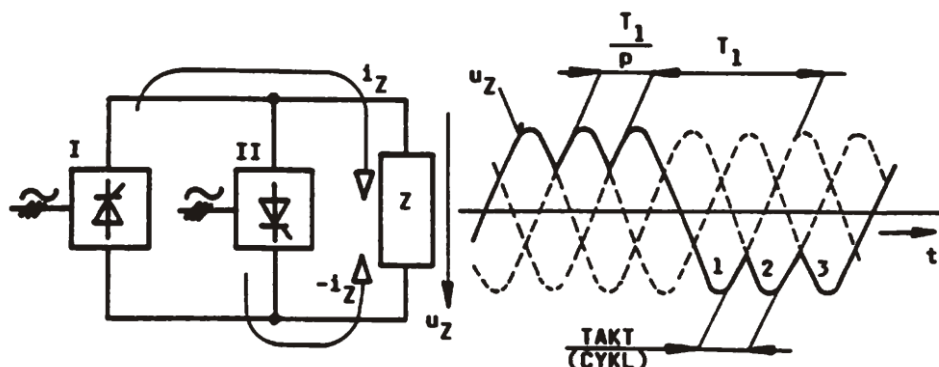
Na obrázku vidíme usměrňovač, za kterým následuje stejnosměrný obvod obsahující filtrační kondenzátor s poměrně velkou hodnotou (až tisíc μF). Také je určeno, že stejnosměrný obvod se vzhledem ke střídači chová jako zdroj napětí. Dále vidíme tlumivku, která vyhlazuje proud usměrňovače a spolu se zmíněným kondenzátorem tvoří vstupní filtr napět'ového střídače. Mnohdy se v stejnosměrném obvodu tlumivka nevyskytuje, její funkci poté nahradí rozptylová indukčnost transformátoru, přes který je k napájecí síti připojen usměrňovač. (1)

2.1.2 Přímé měniče kmitočtu

Přímé měniče kmitočtu umožňují vytvořit výstupní střídavé napětí s říditelným kmitočtem, ze vstupního střídavého napětí o vstupním kmitočtu bez stejnosměrného mezi-obvodu. Tyto měniče se ještě dělí na přímé měniče kmitočtu s vnější komutací (komutace napájecí sítě) a přímé měniče kmitočtu s vlastní komutací (využití vypínatelných polovodičových součástek).

2.1.2.1 Přímé měniče kmitočtu s vnější komutací

U přímých měničů kmitočtu se křivka výstupního napětí utváří přímo z části křivek trojfázového či vícefázového napětí o kmitočtu nejčastěji 50 Hz. Jedná se v podstatě o vhodně řízené čtyřkvadrantové spojení usměrňovačů. Jsou též nazývány cyklokonvertory. Pro účelnou stručnost práce se tomuto tématu opět věnujeme jen stručně, probereme jen základní princip. Ukázku principu jednofázového přímého měniče kmitočtu, můžeme vidět na obr. 2.2.



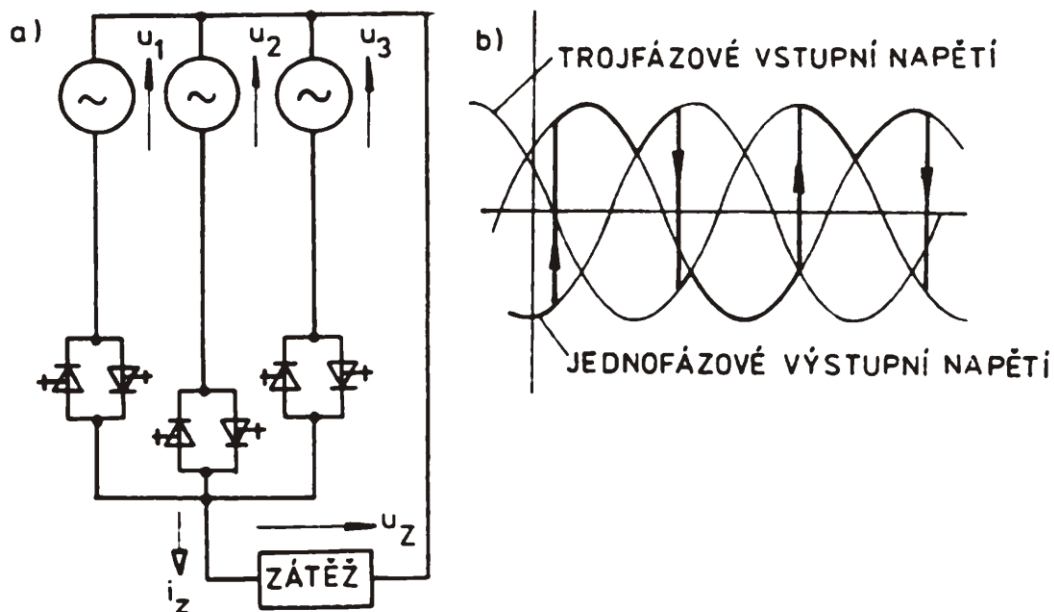
Obr. 2.2 Princip jednofázového přímého měniče kmitočtu (4)

Usměrňovače I a II čtyřkvadrantového měniče se periodicky střídají v činnosti. Tímto principem na zátěži vzniká střídavé jednofázové napětí. Výstupní kmitočet měniče se mění s počtem taktů mezi střídáním činnosti obou usměrňovačů. Příkladem, přibližný průběh výstupního napětí přímého měniče u_Z na obr. 2.2 předpokládá, střídání činnosti usměrňovačů I a II po třech cyklech. Z tohoto důvodu jméno cyklokonvertory. Pro trojfázový přímý měnič kmitočtu použijeme, vhodnou kombinaci tří měničů jednofázových. Z průběhů napětí, které vidíme na obr. 2.2, vyplývá to, že výstupní kmitočet je možno oproti vstupnímu pouze snižovat, nikoli zvyšovat. Maximální dosažitelné hodnoty používaných trojfázových cyklokonvertorů je 25Hz. To je velmi malá hodnota oproti přímým měničům kmitočtu s vlastní komutací. Výhoda cyklokonvertorů však spočívá v tom, že stejně jako usměrňovače mohou pracovat s velmi vysokými výkony. Cyklokonvertory se v praxi nejčastěji využívají pro napájení pomaloběžných pohonů velkých výkonů. (4)

2.1.2.2 Přímé měniče kmitočtu s vlastní komutací

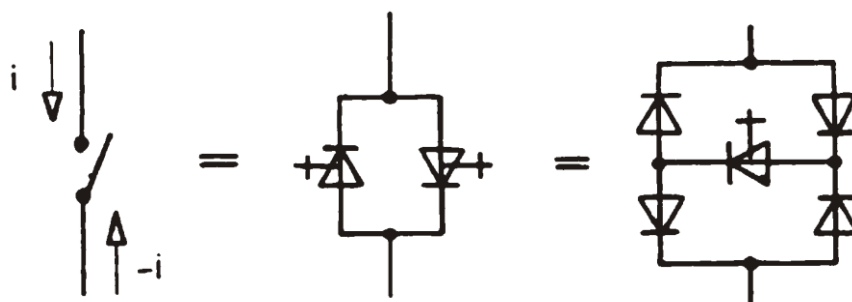
U přímých měničů kmitočtu s vlastní komutací, je výstupní kmitočet nezávislý na kmitočtu vstupním. Podobně jako u nepřímých měničů kmitočtu dosahuje běžně výstupních kmitočtů stovky Hz. Základní spojení přímých měničů kmitočtu s vlastní komutací, v podstatě kopírují přímé měniče kmitočtu s vnější komutací, s tím rozdílem, že u přímých měničů s vlastní komutací jsou použity místo tyristorů vypínatelné součástky. Ukázku zjednodušeného klasického přímého měniče kmitočtu s vlastní komutací v uzlovém spojení, můžeme vidět na obr. 2.3a. Na tomto obrázku vidíme že, toto schéma má původ v antiparalelním spojení dvou

trojfázových uzlových usměrňovačů s vnější komutací. Schéma průběhu napětí na zátěži vidíme na obrázku 2.3b. Uvedený průběh by mohl být zkvalitněn zavedením šířkové pulzní modlace.



Obr. 2.3 Klasický přímý měnič kmitočtu s vlastní komutací v uzlovém spojení, schéma a průběh napětí na zátěži (1)

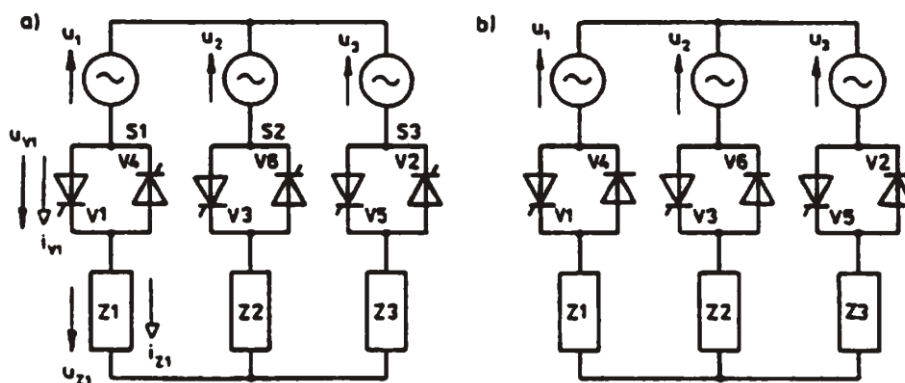
Můstková spojení přímých měničů, mají sice dvakrát více součástek oproti uzlovým, ale vykazují příznivější křivku, z níž se vychází při tvorbě výstupního napětí měniče. Ve srovnání s nepřímými měniči, má sledovaný obvod značně vyšší počet součástek, ale bez lepších technických vlastností. Počet vypínatelných součástek lze ovšem zmenšit tím, že jejich antiparalelní spojení se nahradí jednou vypínatelnou součástkou a čtyřmi diodami, jak můžeme vidět na obr. 2. 4. (1)



Obr 2.4 Polovodičový vypínatelný spínač pro oba směry proudu (1)

2.2 Střídavé měniče napětí

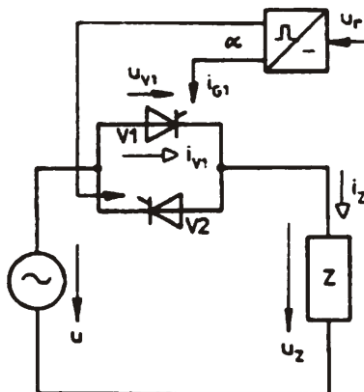
Střídavé měniče napětí slouží k řízení napětí a tedy i proudu a výkonu střídavé zátěže. Zastupují funkci plynule regulovatelného snižovacího transformátoru. Střídavé měniče napětí se používají pro řízení výkonu elektrotepelných spotřebičů, pro řízení svítivosti svítidel, pro měkké spouštění střídavých motorů středních a velkých výkonů a pro řízení rychlosti univerzálních komutátorových motorů, obsažených např. v elektrickém nářadí, vysavačích a tak dále. Výkonové obvody střídavých měničů jsou velmi podobné výkonovým obvodům střídavých spínačů, liší se pouze ve způsobu řízení. Jednofázový měnič napětí, který si dále blíže probereme a nasimulujeme v programu OrCAD, můžeme vidět na obr. 2.6. Simulaci provedeme také pro trojfázový střídavý měnič napětí pro R zátěž. Schémata těchto trojfázových měničů napětí můžeme vidět na obr. 2.5. Kde 2.5a je plně řízený a 2.5b, je polořízený měnič. Na místě antiparalelního spojení je možno použít triak, ten se doporučuje pouze pro zátěž vykazující při běžném střídavém napájení velký účinník. (1)



Obr. 2.5 Schéma plně řízeného a polořízeného trojfázového střídavého měniče napětí. (1)

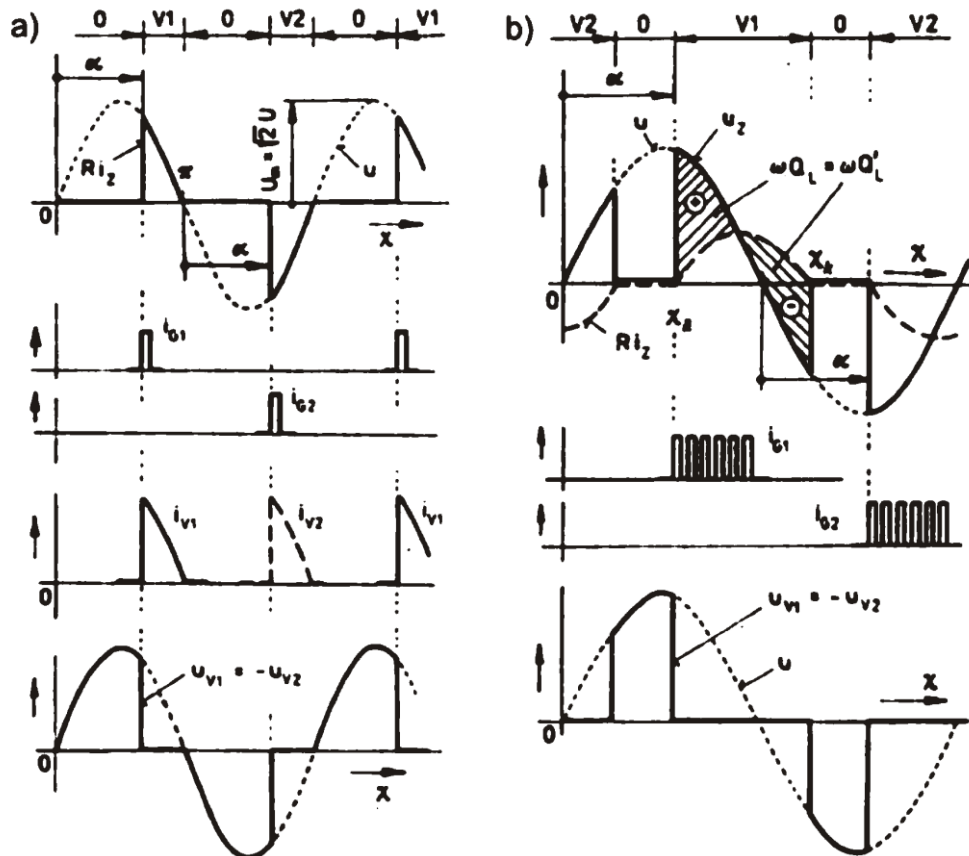
2.2.1 Jednofázový střídavý měnič napětí

Jednofázový měnič včetně bloku řízení můžeme vidět na obr. 2.6. Pomocí signálu u_r , který vstupuje do bloku řízení, řídíme napětí na střídavé zátěži. V další části si probereme jednotlivé druhy zátěže.



Obr. 2.6 Jednofázový střídavý měnič napětí (1)

Jako první si probereme měnič se zátěží R. Na obr. 2.7a vidíme napěťové a proudové poměry měniče naznačeného na obr. 2.6 s tím, že jako zátěž je právě činný odpor R. Vzhledem k začátku kladné půlvolny napětí u , je tyristor V1 zapínán s určitým zpožděním α . Po sepnutí V1 je $u_z = Ri_z > 0$. Mezi taktem V1 a taktem V2 je prodleva (nazýváme takt 0). Tuto prodlevu způsobuje zpoždění zapnutí V2, vzhledem k začátku záporné půlvolny napětí u o uhel α . Po zapnutí V2 je $u_z = Ri_z < 0$. Úhel sepnutí α nazýváme úhlem řízení. U jednofázového měniče má smysl při rozsahu $0 \leq \alpha < \pi$. Když bude α nulové měnič se bude chovat jako spínač. Na zátěži může být největší napětí, napětí rovné hodnotě napětí napájecího zdroje. Při zvětšování řídicího úhlu α , se napětí na zátěži zmenšuje. Při hodnotě $\alpha = \pi$, je napětí na zátěži nulové.



Obr. 2.7 Proudové a napěťové poměry měniče z obr. 2.6 a) při zátěži R. b) při zátěži R, L a při $\varphi < \alpha < \pi$ (1)

Měnič se zátěží R, L, při poměrech $\varphi < \alpha < \pi$ vidíme na obr. 2.7b, kde φ je krajní mez uvedeného rozsahu α . Je určena vztahem

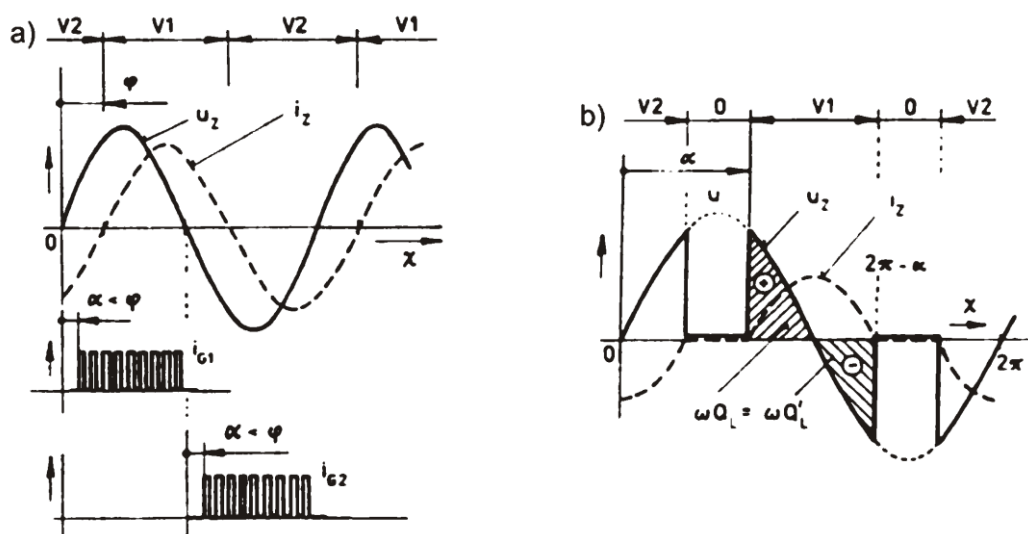
$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R} \quad (2.1)$$

Takt V1 a s ním i kladná půlvolna proudu zátěže i_z začíná se říditelným zpožděním α vzhledem k začátku kladné půlvolny napětí u . Pro kladnou půlvolnu proudu i_z platí. (začátek kladné půlvolny napětí odpovídá úhlu $x = 0$, s tím že $x_z = \alpha$).

$$i_Z = \frac{U_m}{Z} \sin(x - \varphi) - \frac{U_m}{Z} e^{-\frac{R}{\omega L}(x-a)} \sin(\alpha - \varphi) \quad (2.2)$$

Křivky u_Z a Ri_Z spolu vymezují plochy, jejich obsah je úměrně veliký napětovému množství přivedenému Q_L a napětovému množství odňatému Q'_L indukčnosti zátěže v průběhu půlvlny proudu. Mezi kladnou a zápornou půlvlnou proudu i_Z je prodleva (již dříve zmíněný takt 0). Takt V2 a tím pádem i záporná půlvlna i_Z začíná opět se zpožděním α vzhledem k začátku záporné půlvlny napětí u .

Na obr 2.8a vidíme průběh napětí a proudu na R, L, zátěži při poměrech $0 < \alpha < \varphi$. Řízení v tomto rozsahu je necitlivé. Průběh proudu a napětí zátěže vypadá stejně jako by na místě měniče byl spínač.



Obr. 2.8 Průběhy napětí a proudu jednofázového střídavého měniče napětí a) pro R, L zátěž při $0 < \alpha < \varphi$ b) u L zátěže a při $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$ (1)

Jako poslední uvádím L zátěž, při poměrech $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$, ty můžeme vidět na obr. 2.8b. Průběh proudu kladné půlvlny vychází vztahu pro kladnou půlvlnu uvedenou při R, L zátěži s tím rozdílem, že zde platí $R = 0$, $Z = \omega L$, $\varphi = \pi/2$. Po úpravě tedy vyjde vztah.

$$i_Z = \frac{U_m}{\omega L} (\cos \alpha - \cos x) \quad (2.3)$$

Opět je úhel $x = 0$ uvažován v začátku příslušné kladné půlvlny napájecího napětí. Interval jedné půlvlny proudu, při sledované zátěži, můžeme určit z podmínky rovnosti Q_L a Q'_L , vyznačených na obr. 2.8b. Z toho můžeme vyvodit, že interval jedné půlvlny proudu je symetricky rozložen kolem průchodu křivky napájecího napětí nulovou hodnotou. Délku sledovaného intervalu lze z obr. 2.8b, vyčíst $\psi = 2(\pi - \alpha)$.

Poměry při $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$, jsou stejné, jako kdyby na místě měniče byl opět spínač. Napětí a proud jsou na řízení v tomto rozsahu α necitlivé. Proud obvodu je fázově zpožděn za napětím o úhel $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

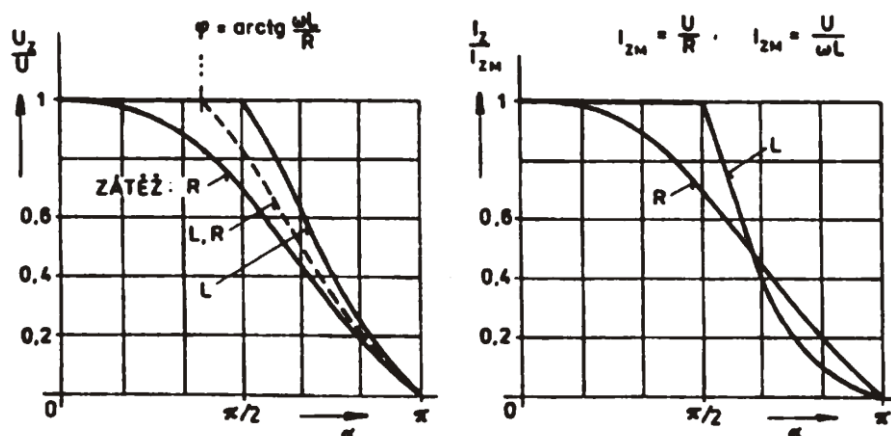
Řídicí impulsy musí mít takový tvar, aby nedošlo k selhání chodu měniče v rozsahu řízení $0 < \alpha < \varphi$. Podívejme se třeba na obr. 2.8a. v úhlu $x = \alpha$, kdy se začínají vysílat řídicí impulsy na tyristor V1, ale ten nemůže být vypnut, protože proud prochází tyristorem V2 a drží tedy na tyristoru V1 závěrné napětí rovné propustnému na tyristoru V2 (tím končí takt 2). Podmínkou je, aby v úhlu $x = \varphi$, ještě trvalo vysílání řídicích impulsů na tyristor V1. Když vezmeme v potaz krajní hodnotu $\varphi = \frac{\pi}{2}$ je nezbytné řešit řízení tak, aby při jakémkoliv úhlu řízení α končil řídicí impuls, nebo řada řídicích impulsů, za polovinou příslušné půlvlny napájecího napětí. Tento problém se řeší tak, že nezávisle na řídicím úhlu α končí řada impulsů vysílaných na tyristor, vždy se zánikem příslušné půlvlny napájecího napětí, jak vidíme na obr. 2.7 (a i b).

Řídicí charakteristiky měniče vyjadřují závislost efektivní hodnoty napětí U_Z , nebo proudu I_Z na úhlu řízení α . Parametry těchto charakteristik jsou určité neproměnné hodnoty zátěže. Pro zátěž R lze charakteristiky $U_Z(\alpha)$ a $I_Z(\alpha)$ odvodit z obr. 2.7a.

$$U_Z = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U \sin x)^2 dx} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (2.4)$$

$$I_Z = \frac{U_Z}{R} = \frac{U}{R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (2.5)$$

Průběhy charakteristik podle těchto vzorců jsou vyobrazeny na obr. 2.9.



Obr. 2.9 Řídicí charakteristiky jednofázového střídavého měniče napětí (1)

Pro zátěž L, můžeme charakteristiku $U_Z(\alpha)$ odvodit z obr. 2.8b

$$U_Z = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} (\sqrt{2}U \sin x)^2 dx} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (2.6)$$

Nesinusový průběh napětí se skládá z jednotlivých harmonických napětí a pro každou z nich má zátěž jinou reaktanci, takže $I_Z \neq U_Z/\omega L$. Takže pro odvození charakteristiky $I_Z(\alpha)$ je nutno využít vztah $i_Z = \frac{U_m}{\omega L} (\cos \alpha - \cos x)$, opět s přihlédnutím na obr. 2.8b.

$$I_Z = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} i_Z^2 dx} = \frac{U}{\omega L} \sqrt{2 \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) (1 + 2 \cos^2 \alpha) + \frac{3}{\pi} \sin 2\alpha} \quad (2.7)$$

Tyto závislosti U_Z a I_Z vyjadřují závislosti pro řídicí charakteristiky jen v rozsahu $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$. V rozsahu $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$, je napětí a proud zátěže konstantní $U_Z = U$, $I_Z = U/\omega L$ nezávisle na řídicím uhlu α jak vidíme na obr. 2.9.

Pro zátěž R, L je odvození řídicích charakteristik velmi náročné, takže se jimi nebudu zabývat. Poznamenal bych pouze, že tyto charakteristiky pro R, L zátěž se nacházejí mezi charakteristikami pro zátěž R a zátěž L. (1)

Praktická část

3 OrCAD PSpice

3.1 Základní popis

OrCAD je softwarový program, který se zabývá návrhovými systémům v elektronice. Díky dobrým vlastnostem a přívětivému rozhraní se stal standardem ve své oblasti. Není určen pouze pro kreslení schémat a následně návrh desky plošného spoje (DPS). Poskytuje nám také produkty pro analogově číslicovou simulaci, výkonné rastrové i bezrastrové autoroutery, zpracování postprocesů, připojení k návrhovými systémům hradlových polí a programovatelných součástek, podpora k připojení podnikové databáze atd.

Ve své práci využívám grafické rozhraní Capture, které slouží k vytváření schémat, které můžeme díky přímo navazujícímu rozhraní PSpice také simulovat. (5)

3.2 PSpice

Počátkem sedmdesátých let byl na Kalifornské univerzitě v Berkeley vyvinut program SPICE. Vývoj tohoto programu byl financován ze státního rozpočtu a stal se tudíž programem ve veřejném užívání (public domain). Na tuto univerzitní verzi navázalo mnoho softwarových firem. Nejúspěšnější se stala firma MicroSim s programem PSpice, který se stal v devadesátých letech mezinárodním standardem pro analogovou a analogově číslicovou simulaci. Po zakoupení MicroSim společností OrCAD se PSpice stala jeho součástí. Stalo se tak od verze 9. Společnost OrCAD také integrovala společnost Cadence jejíž vyšší návrhové systémy pomohly ještě více propojit OrCAD spolu s Capture CIS a PSpice.

Grafický editor umožňuje snadný a bezproblémový schematický návrh i pro simulační program PSpice. Schémata jsou přehledná a snadno se hledají případné chyby v zapojení. Velmi výhodný je fakt, že grafické rozhraní Capture se dá využít nejen pro simulaci PSpice, ale také pro návrh desky plošného spoje. Tento program obsahuje velkou knihovnu, kde můžeme najít velmi mnoho součástek s unikátním grafickým zobrazením. Nové součástky jsou vždy obsaženy v nejnovější verzi, případně se k nim dají stáhnout příslušná data a zařadit tak novou součástku do knihovny. Knihovny schematických značek a modelů můžeme rovněž sami vytvářet.

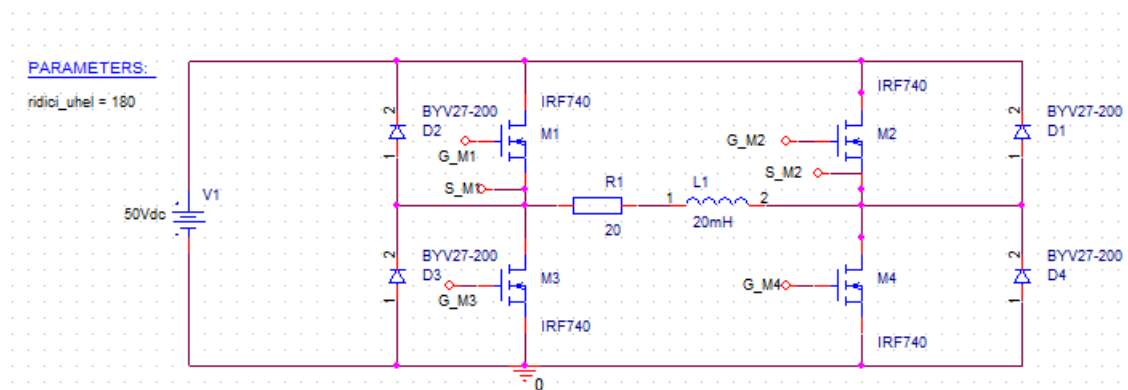
PSpice je univerzální nástroj pro analýzu elektrických obvodů. Dokáže vypočítávat napětí všech uzlů a proudy vývodů všech prvků analogové části simulovaného obvodu a současně logické stavy uzlů v číslicové oblasti obvodu. Dále umožňuje provádět analýzu obvodu v kmitočtové a časové oblasti.

Tento program můžeme přirovnat k měřicímu pracovišti, na kterém ověřujeme daný obvod. Tento obvod si nejprve sestavíme, připojíme k němu budící zdroje a můžeme sledovat co se v něm děje. To má řadu výhod, protože nemusíme stavět prototyp a přesto máme schéma s jednoznačnými hodnotami součástek, ošetřený proti různým hazardům, zákmitům. Další výhodou spočívá v měření proudu a napětí v místech, kde to nebylo možné, nebo minimálně velmi obtížné. A to tam, kde připojení měřicí sondy výrazně ovlivní chování obvodu. (5)

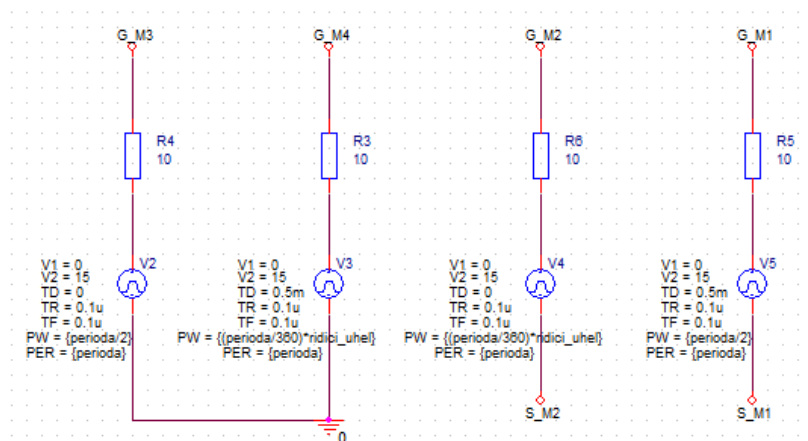
4 Simulace

4.1 Jednofázový napěťový střídač v můstkovém zapojení

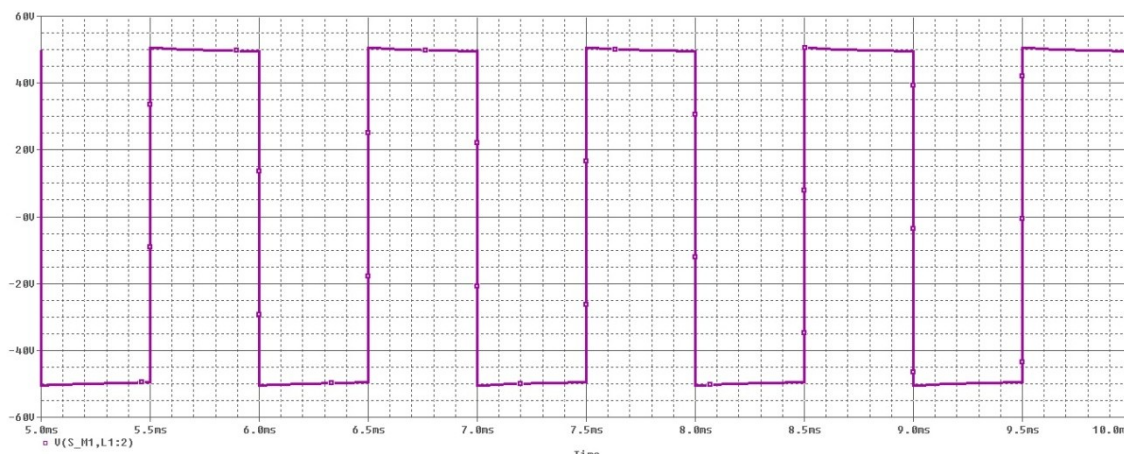
Schéma jednofázového napěťového střídače v můstkovém zapojení s RL zátěží, vidíme na obr. 4.1. U tohoto schématu vidíme možnost měnit řídicí úhel. Na obrázku 4.2 vidíme řídicí obvod k jednofázovému napěťovému střídači, pro obdélníkové řízení. V kolonce nastavení šířky pulzu pro řízení, můžeme vidět, že řízení se dotýká pouze vypínatelných součástek M2 a M4, proč tomu tak je, najdeme popsáno v teoretické části. Při nastavování řídicího úhlu nesmíme zapomenout na uvedený rozsah $0 < \psi < \pi$ což v prakticky ve schématu znamená $0 < \text{ridici_uhel} < 180$. Výstupní napětí a proud na zátěži pro nejpoužívanější hodnotu $\psi = \pi$, vidíme na obr. 4.3 a obr. 4.4. Výstupní napětí řídicích obvodů pro řídicí úhel $\psi = \pi$, můžeme vidět v příloze 1 na obr. 1. Na obr. 2 v příloze 1, můžeme vidět výstupní napětí a proud pro řídicí úhel $\psi = \pi/2$. Řídicí obvod pro pulzně šířkové řízení (PWM) vidíme v příloze 1 na obr. 3. Výstupní napětí a proud pro tento druh řízení je zobrazen v příloze 1 obr. 4.



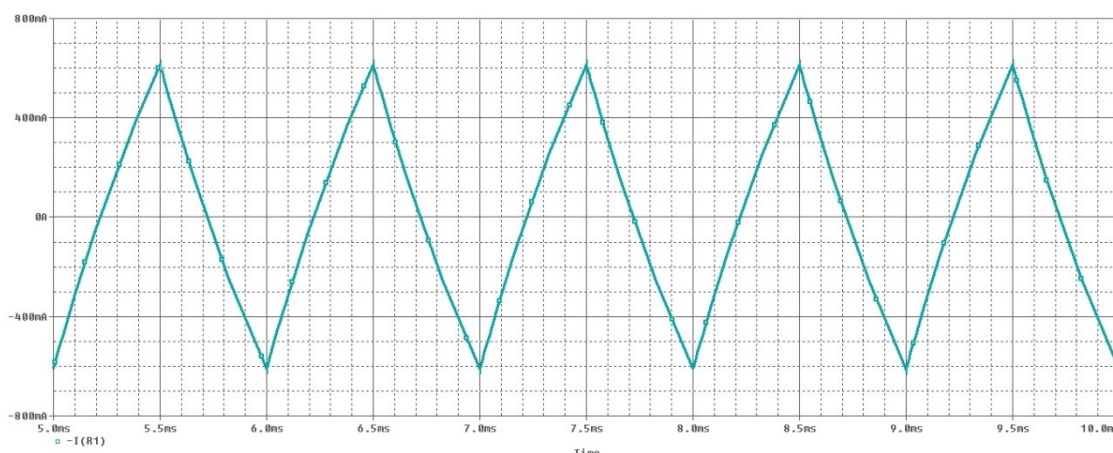
Obr. 4.1 Schéma jednofázového napěťového střídače s RL zátěží a proměnným řídicím úhlem v programu OrCAD PSpice



Obr. 4.2 Schéma řídicího obvodu jednofázového napěťového střídače pro obdélníkové řízení



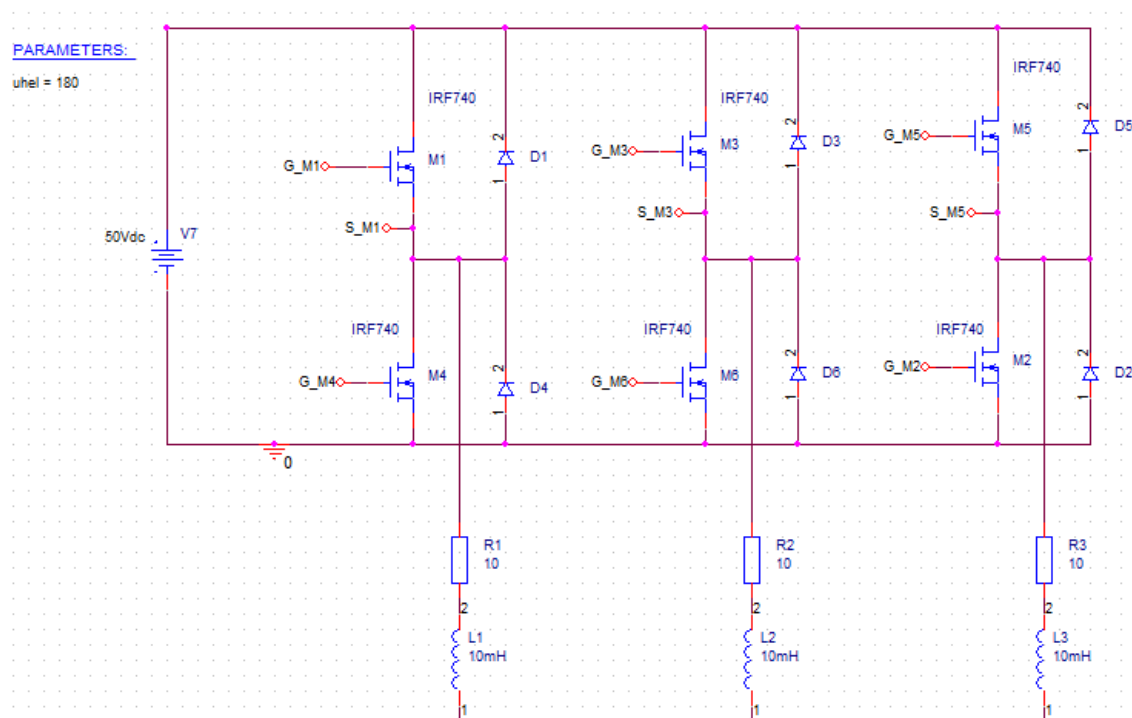
Obr. 4.3 Výstupní napětí na zátěži jednofázového napětového střídače pro $\psi = \pi$



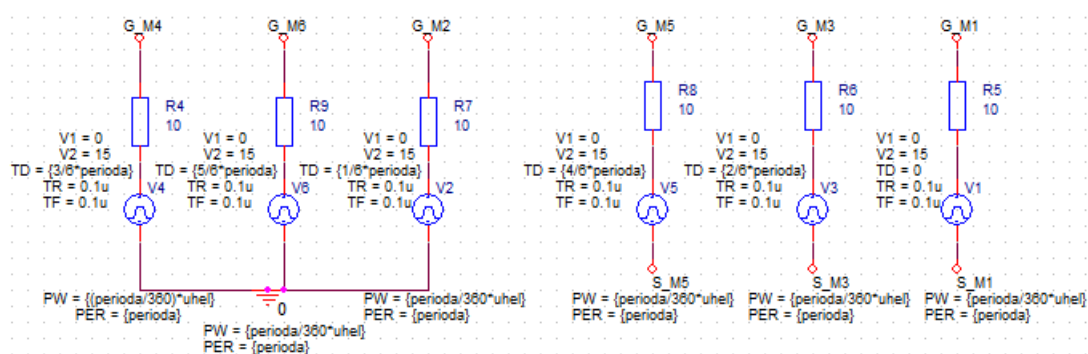
Obr. 4.3 Výstupní proud na zátěži jednofázového napětového střídače pro $\psi = \pi$

4.2 Trojfázový napětový střídač v můstkovém zapojení

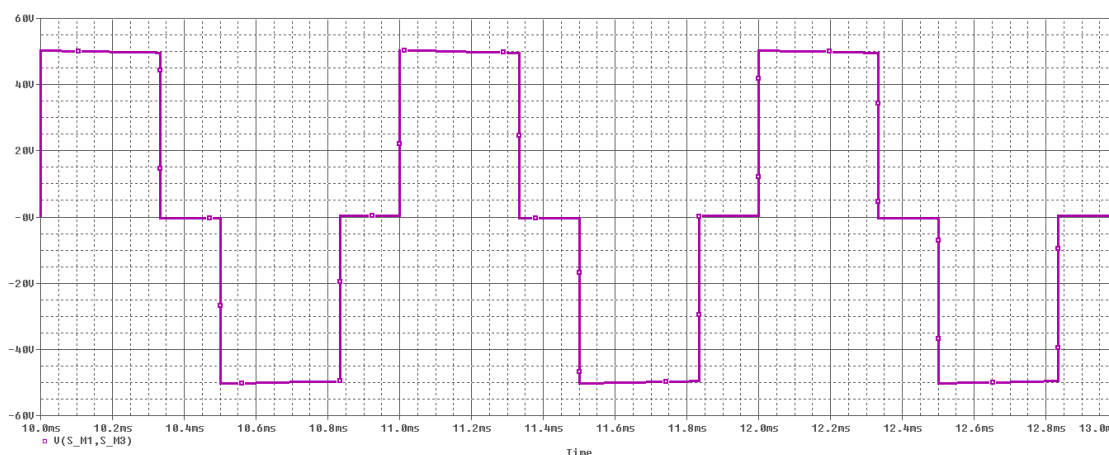
Schéma trojfázového napětového střídače s RL zátěží, v můstkovém zapojení vidíme na obr. 4.4. Opět bylo toto schéma děláno s proměnným řídicím úhlem, aby tyto simulace mohli být dále využity. Řídicí obvod tohoto střídače pro obdélníkové řízení je na obr. 4.5. Pro toto řízení platí podmínky pospané v teoretické části. Je potřeba pouze zmínit dovolený rozsah řízení $\pi/3 < \psi < \pi$, na který nesmíme zapomenout. To znamená prakticky ve schématu zadávání řídicího úhlu v rozsahu $60 < \psi < 180$. Výstupní fázové a sdružené napětí na čistě činné zátěži pro typickou hodnotu $\psi = \pi$ (180°), vidíme na Obr. 4.6 a 4.7. Napětí pro další typické hodnoty nalezneme v příloze 2. Na obr. 1 této přílohy vidíme sdružené napětí pro úhel řízení 150° . Na obr. 2 vidíme fázové napětí pro tento úhel. Obr. 3 a 4 přílohy 2 nám zobrazují sdružené a fázové napětí trojfázového střídače pro úhel řízení 120° . Nakonec jsou v příloze 2 přiloženy průběhy sdruženého a fázového napětí pro úhel 90° , a to na obr. 5 a 6.



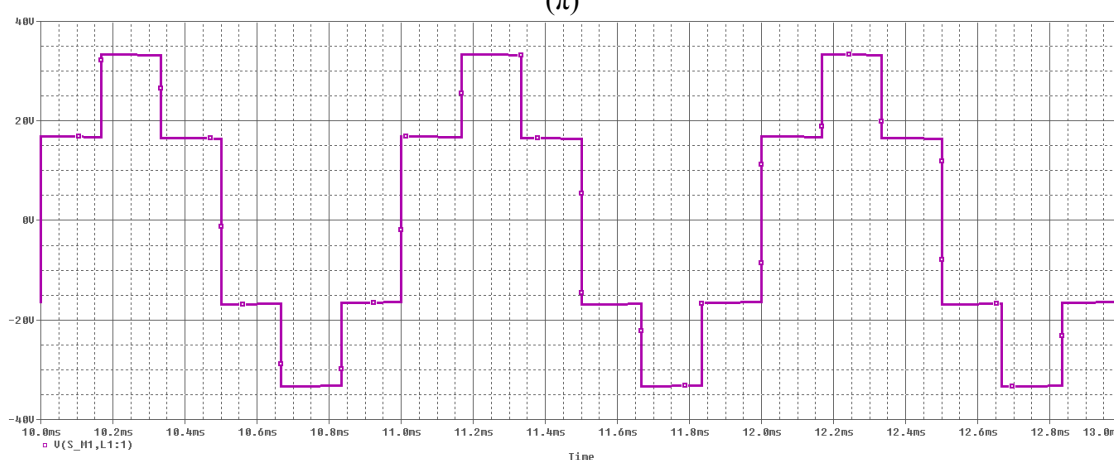
Obr. 4.4 Schéma trojfázového napětového střídače v můstkovém zapojení s RL zátěží a proměnným řídicím úhlem v programu OrCAD PSpice



Obr. 4.5 Schéma řídicího obvodu trojfázového napětového střídače pro obdélníkové řízení



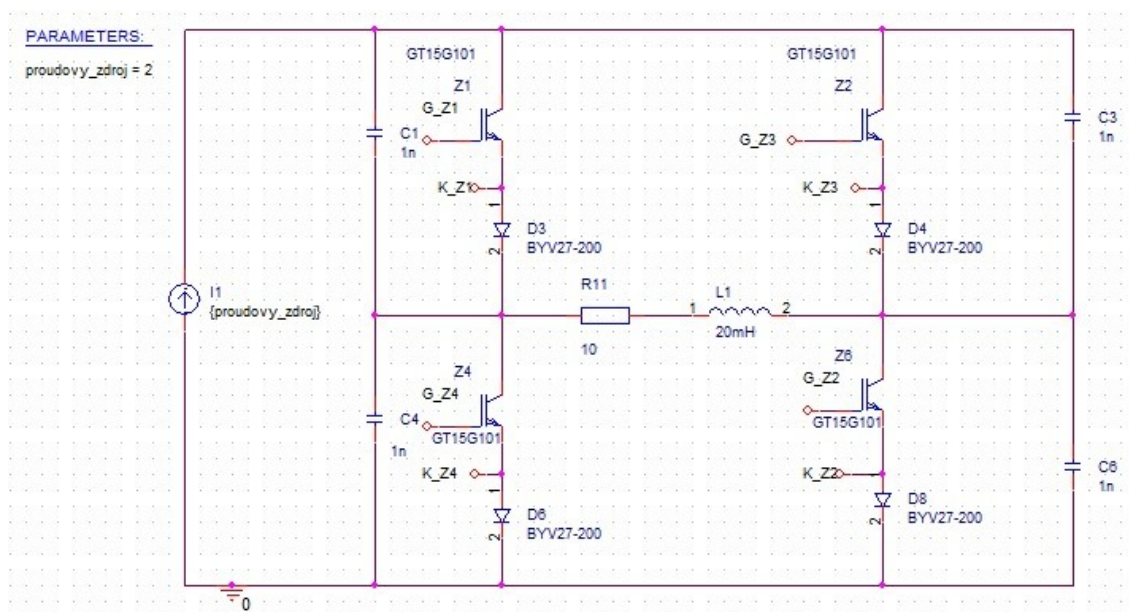
Obr. 4.6 Průběh sdruženého (U_{z12}) napětí na R zátěži trojfázového střídače při úhlu řízení 180° (π)



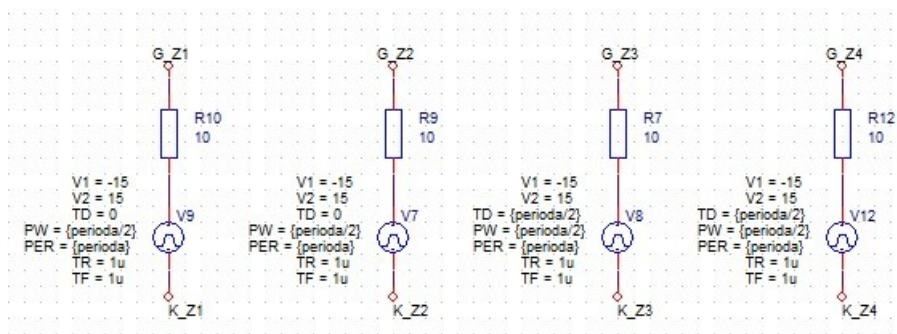
Obr. 4.7 Průběh fázového (U_{z1}) napětí na R zátěži trojfázového střídače při úhlu řízení 180° (π)

4.3 Jednofázový proudový střídač

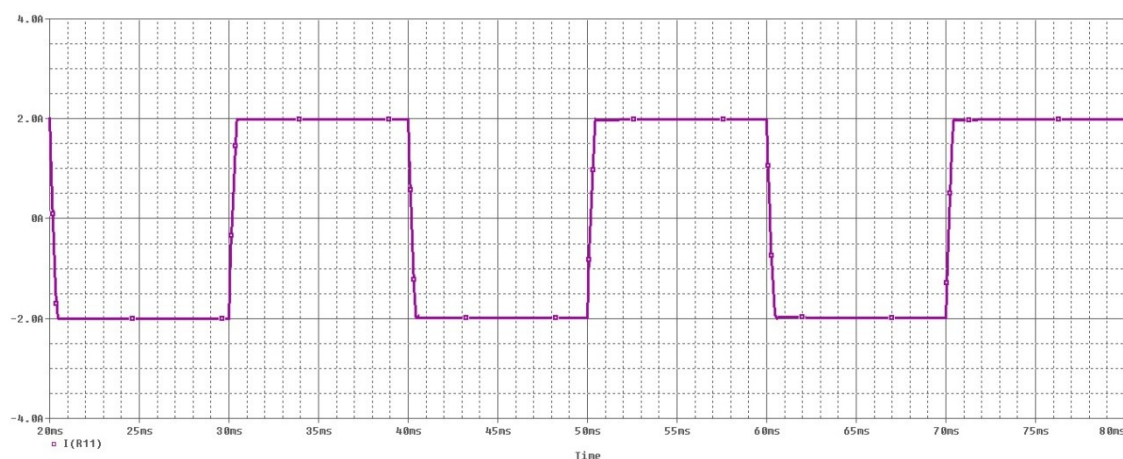
Schéma jednofázového proudového střídače s R, L zátěží v můstkovém zapojení, z programu OrCAD PSpice vidíme na obr. 4.8. Řídicí obvod tohoto střídače je na obr. 4.9. U tohoto obvodu není možné měnit řídicí úhel. Řízení se provádí pomocí změny hodnoty stejnosměrného zdroje. Proto vidíme na schématu z obr. 4.8 možnost měnit proud stejnosměrného zdroje. Výstupní proud na R, L zátěži při hodnotě 2A stejnosměrného zdroje, můžeme vidět na obr. 4.10. V příloze 3 na obr. 1 vidíme výstupní proud na zátěži při R zátěži a na obr. 2 stejné přílohy je vyobrazen proud zátěže při L zátěži. Dále jsou v příloze 3 připojeny dva průběhy napětí, které byly značně deformovány napěťovými překmity, proto jsme pro jejich vyobrazení umístili na výkonové součástky RC obvody. Vidíme tak na obr. 3 přílohy 3 průběh napětí na stejnosměrném zdroji a na obr. 4 průběh napětí na zátěži. Oba průběhy jsou pořízeny pro R, L zátěž.



Obr. 4.8 Schéma jednofázového proudového střídače s R, L zátěží a proměnnou hodnotou stejnosměrného zdroje v programu OrCAD PSpice



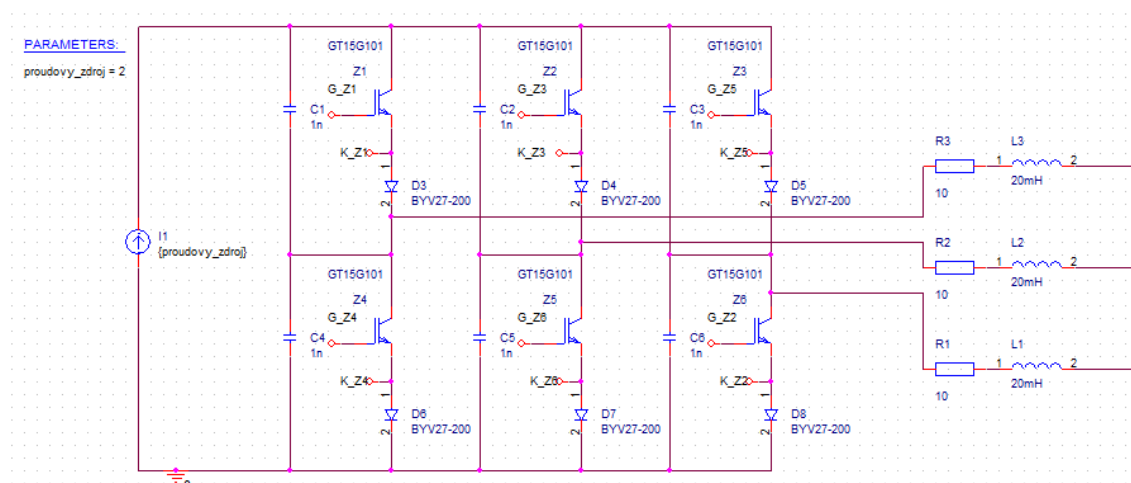
Obr. 4.9 Schéma řídicího obvodu jednofázového proudového střídače



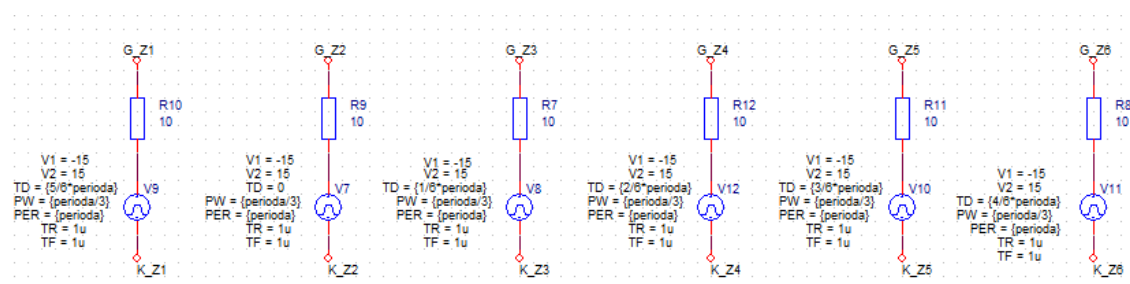
Obr. 4.10 Průběh proudu na R, L zátěži jednofázového proudového střídače

4.4 Trojfázový proudový střídač

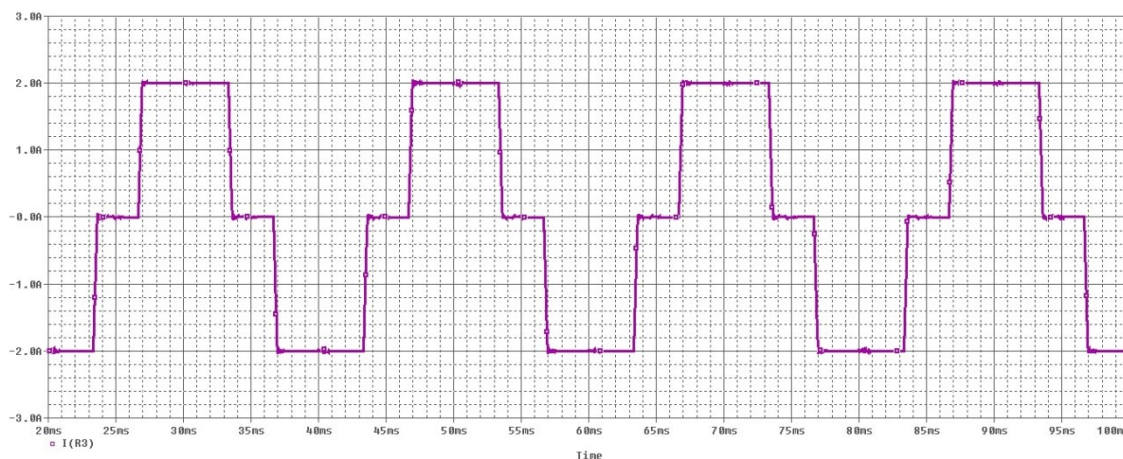
Schéma trojfázového proudového střídače v programu OrCAD PSpice vidíme na obr. 4.11. V tomto schématu je možné řídit stejnosměrný zdroj, který nám ovlivňuje napětí na zátěži (amplitudové řízení). Řídicí obvod tohoto trojfázového proudového střídače vidíme na obr. 4.12. Úhly sepnutí jednotlivých hlavních tyristorů jsou posunuty o $1/3\pi$ a interval sepnutí hlavních tyristorů je $2/3\pi$. Tyto intervaly jsou neměnné. Řízení tedy probíhá, jak již bylo zmíněno amplitudově. Obr. 4.13 nám znázorňuje proud na zátěži I_{Z1} , při hodnotě stejnosměrného zdroje 2A. V příloze 4 na obr. 1, můžeme vidět výstupní proud I_{Z1} , při hodnotě stejnosměrného zdroje 1A. Na obr. 2 stejné přílohy, můžeme vidět proudy zátěže všech větví (I_{Z1} , I_{Z2} , I_{Z3}). Napětí na stejnosměrném proudovém zdroji, můžeme vidět na obr. 3 přílohy 4. Napětí na zátěži bylo značně zdeformované překlmy, pro jeho vyhlazení jsme paralelně připojili na spínací součástky RC členy. Výsledný průběh tohoto napětí, vidíme na obr. 4 přílohy 4.



Obr. 4. 11 Schéma trojfázového proudového střídače v můstkovém zapojení s RL zátěží a proměnným proudovým zdrojem v programu OrCAD PSpice.



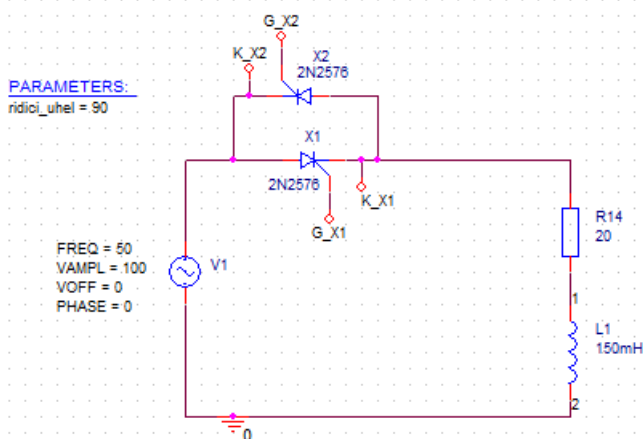
Obr. 4. 12 Schéma řídicího obvodu trojfázového proudového střídače



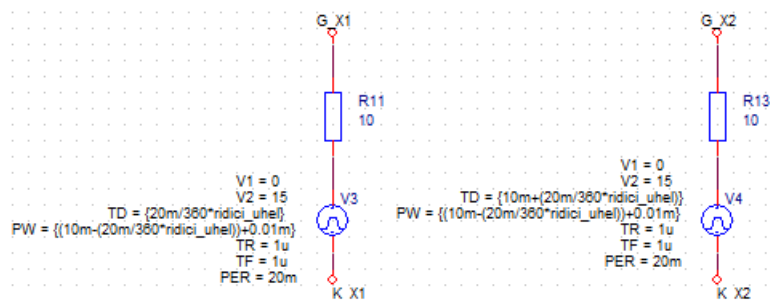
Obr. 4. 13 Průběh proudu na zátěži (I_{Z1}) trojfázového proudového střídače

4.5 Jednofázový střídavý měnič napětí

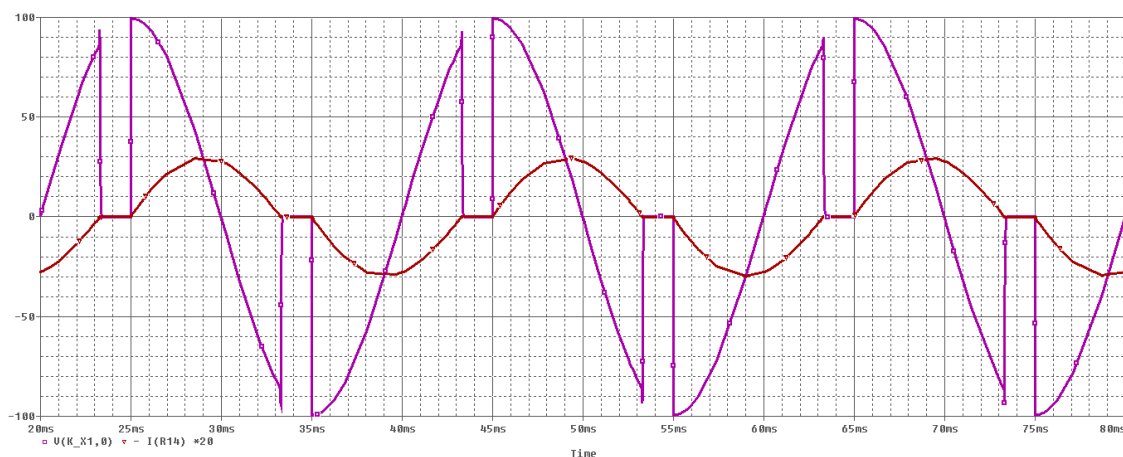
Na obr. 4. 14 vidíme schéma jednofázového střídavého měniče napětí s R, L zátěží. Schéma řídicího obvodu jednofázového střídavého měniče napětí je na obr. 4. 15. Vidíme možnost měnit řídicí úhel, který je aktuálně na 90° . Napětí na zátěži pro tento úhel vidíme na obr. 4. 16. V tomto průběhu je také vyznačena křivka Ri_Z , která spolu s křivkou napětí na zátěži vymezuje plochu napěťového množství přivedeného Q_L a napěťovému množství odňatého Q'_L , jak můžeme také vidět na obr. 2.7. Řízení pro R, L zátěž je $\varphi < \alpha < \pi$. Což prakticky ve schématu znamená $\varphi < \text{ridici_uhel} < 180$. Průběh napětí na zátěži pro řídicí úhel 120° vidíme v příloze 5 obr. 1. Ve stejné příloze na obr. 5 vidíme výstupní napětí při R, L zátěži a řídicím úhlu 60° , což spadá do rozsahu $0 < \alpha < \varphi$. Tento rozsah je pro řízení necitlivý a takovýto měnič napětí se chová jako jednofázový střídavý spínač. Na obr. 1, 2 a 3 přílohy 5, vidíme srovnání výstupního napětí při úhlu řízení 120° mezi R, L zátěží R zátěží a L zátěží. Na obr. 4 přílohy 5 vidíme napětí na zátěži při L zátěži a úhlu řízení 100° .



Obr. 4. 14 Schéma jednofázového střídavého měniče napětí s R, L zátěží a proměnným řídicím úhlem v programu OrCAD PSpice



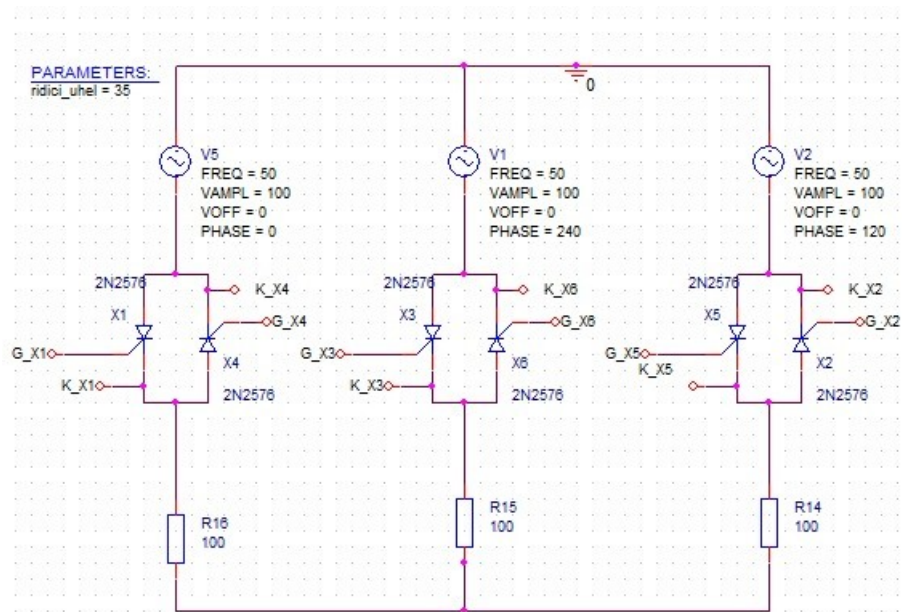
Obr. 4. 15 Schéma řídicího obvodu jednofázového střídavého měniče napětí



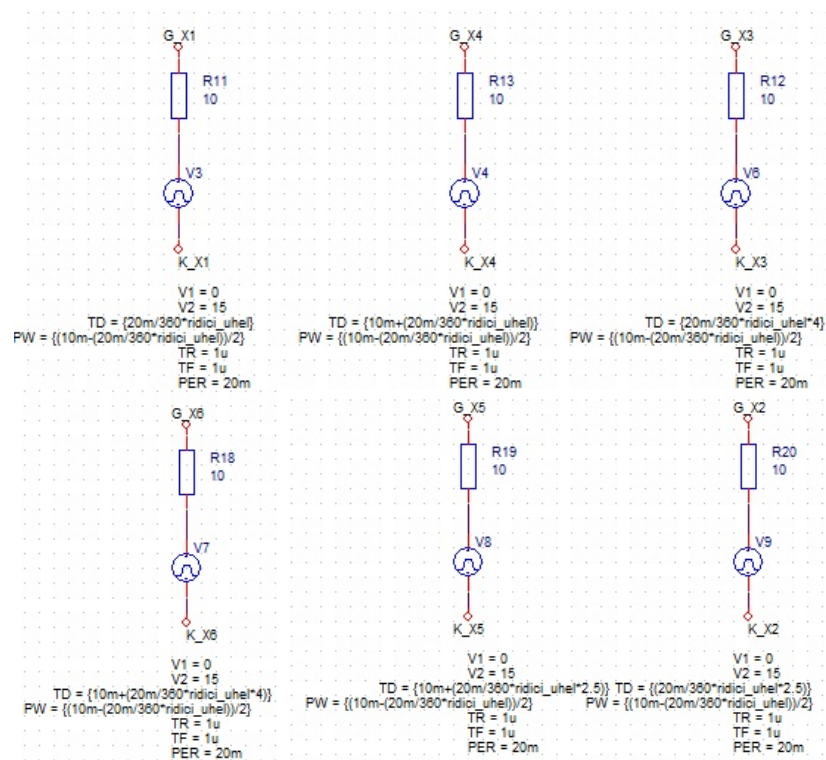
Obr. 4. 16 Výstupní napětí a křivka R_L na zátěži jednofázového střídavého měniče napětí pro R, L zátěž a úhel řízení 90°

4.6 Trojfázový střídavý měnič napětí

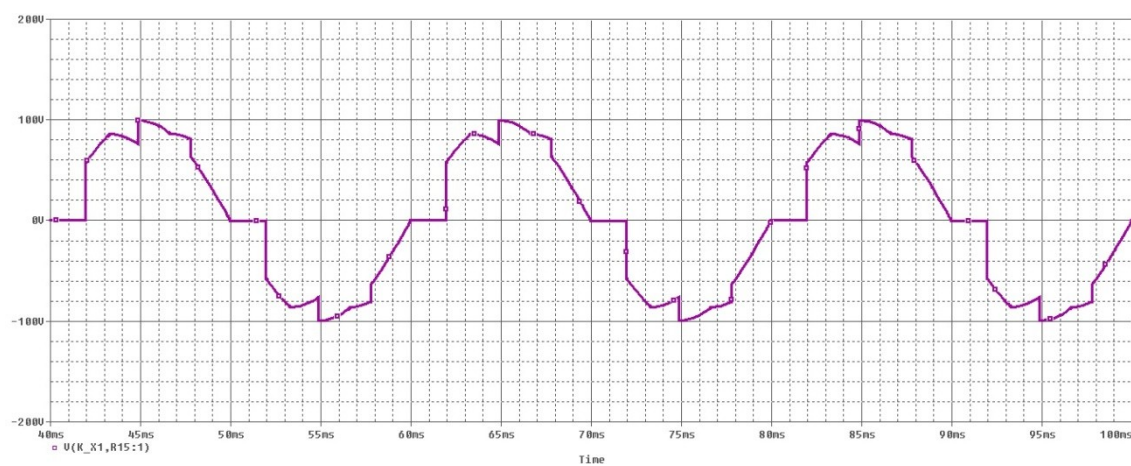
Schéma trojfázového střídavého měniče napětí s R zátěží z programu OrCAD PSpice, můžeme vidět na obr. 4. 17. Jeho řídicí obvod je zobrazen na obr. 4.18. Vidíme možnost měnit řídicí úhel, ten je díky použité R zátěži, v rozsahu $0 < \alpha < \pi/3$, což prakticky znamená v OrCAD schématu $0 < \alpha < 60$. Napětí na zátěži pro úhel řízení 35° , vidíme na obr. 4.19. sdružené napětí pro stejný úhel je zobrazeno na obr. 4.20. V příloze 6 na obr. 1 můžeme vidět průběh napětí na zátěži a sdružené napětí pro úhel řízení 30° . Povšimněme si, jaké změny nastávají při tak malé změně řídicího úhlu. Na obr. 2 přílohy 6, vidíme průběh proudu na zátěži při úhlu řízení 35° . Můžeme konstatovat, že tvar proudu kopíruje tvar napětí. Nakonec přikládáme do přílohy 6 na obr. 3 napětí na dvojici součástek X1 a X4 při řídicím úhlu 35° .



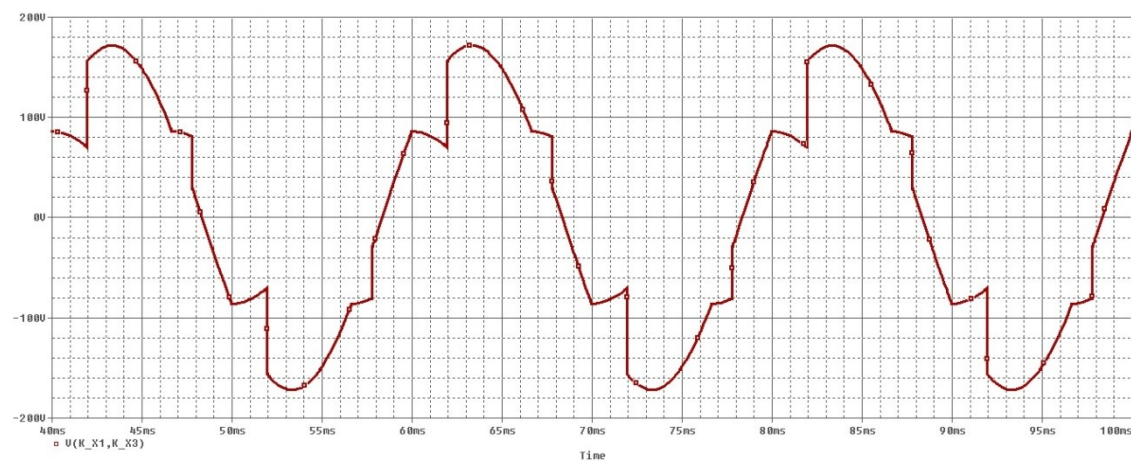
Obr. 4. 17 Schéma trojfázového střídavého měniče napětí s R zátěží a proměnným řídicím úhlem v programu OrCAD PSpice



Obr. 4. 18 Schéma řídicího obvodu trojfázového střídavého měniče napětí



Obr. 4.19 Průběh napětí na zátěži trojfázového napět'ového měniče, při R zátěži a úhlu řízení 35°



Obr. 4.20 Průběh sdruženého napětí trojfázového napět'ového měniče, při R zátěži a úhlu řízení 35°

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření simulačních modelů střídačů a střídavých měničů, u kterých budeme ověřovat jejich chování pro různé provozní stavy, což byli v našem případě různé řídicí úhly a zátěže. Většinu daných obvodů jsme testovali pro R zátěž, L zátěž a R, L zátěž. V některých případech jsme daný obvod testovali pouze na jednom typu indukčnosti a to zpravidla tam, kde rozdíl mezi jednotlivými zátěžemi není tak markantní, nebo v případě, že daný obvod měl více zajímavých průběhů a na jiné typy zátěže z důvodů udržení účelné stručnosti nezbylo místo. Model umístění simulací v této práci je pro všechny stejný. V kapitole 4 simulace je pro každý simulovaný měnič umístěno schéma z programu OrCAD jeho řídicí obvod, stručné vysvětlení způsobu řízení a poté nejdůležitější průběhy. Na další průběhy pro různé provozní stavy a zátěže daného měniče se vždy odkazujeme do příloh, kde má každý simulovaný obvod svou část. Tento princip byl volen, aby rozsah práce zůstal v doporučených mezích, a přitom jsme mohli vidět všechny podstatné průběhy.

Výsledné průběhy ze simulací se shodují s těmi ve výkladu, takže se dá konstatovat, že byla ověřena jejich funkčnost. Samozřejmě někdy dochází k odchylkám, jelikož průběhy v teoretické části mohou být idealizované, zatímco simulace v programu OrCAD PSpice jsou reálné, s reálnými vlastnostmi vložených součástek. Ovšem tato vlastnost dělá z OrCAD PSpice ideální nástroj pro testování navrženého obvodu před výrobou. V některých průbězích především při měření napětí v proudových střídačích, docházelo ke zkreslení průběhu, vlivem vzniklých překmitů, ať už při měření napětí na stejnosměrném zdroji, nebo na zátěži. Tuto komplikaci z podstatné části vyřešilo připojení RC článku na spínací součástku.

Můj přínos touto prací spočívá v nasimulování simulačních modelů a jejich následné předání v podobě souborů z programu OrCAD. Proto jsem se snažil, aby výsledné schémata byli uživatelsky přívětivé. Aby byly zobrazeny např. pouze parametry, které uživatel potřebuje pro řízení výstupu na zátěži. Co se týče dalšího vývoje této práce je možnost tyto mnou nasimulované simulační modely, zakomponovat jako součást složitějších obvodů. Některé měniče, které jsem simuloval, potřebují pro své lepší řízení např. usměrňovače, nebo jiné obvody. Tím pádem je zřejmé, že má bakalářská práce je v přímé návaznosti na jinou bakalářskou práci, zabývající se simulací usměrňovačů a DC/DC měničů, která je v tomto roce řešena. Mé simulované obvody by se také daly prakticky vytvořit, ale jako takové by v praxi nebyly moc využitelné. Hodily by se, akorát v případě demonstrace funkčnosti, což by bylo výhodné např. na nějakou školní laboratorní úlohu.

Literatura

1. Vondrášek, František. *Výkonová elektronika. Svazek 3 - Měniče s vlastní komutací a bez komutace*. Plzeň : ZČU, 1998.
2. Pavelka, Jiří a Čerovský, Zdeněk. *Výkonová elektronika*. Praha : ČVUT, 2002.
3. Vondrášek, František. *Výkonová elektronika - Teorie měničů část 2*. Plzeň : VŠSE, 1981.
4. Vondrášek, František. *Výkonová elektronika. Svazek 2 - Měniče s vnější komutací*. Plzeň : ZČU, 1994.
5. Záhlava, Vít. *OrCAD 10*. Praha : Grada, 2004.
6. Vondrášek, František. *Výkonová elektronika. Svazek 1 - Přehled výkonových polovodičových součástek*. Plzeň : ZČU, 1994.
7. Rombaut, Christian, Segulier, Guy a Bausiere, Robert. *Power electronic converters: AC -AC conversion*. Ney York : McGraw-Hill, 1987.
8. Vondrášek, František. *Výkonová elektronika - Teorie měničů část 1*. Plzeň : VŠSE, 1981.

Seznam příloh

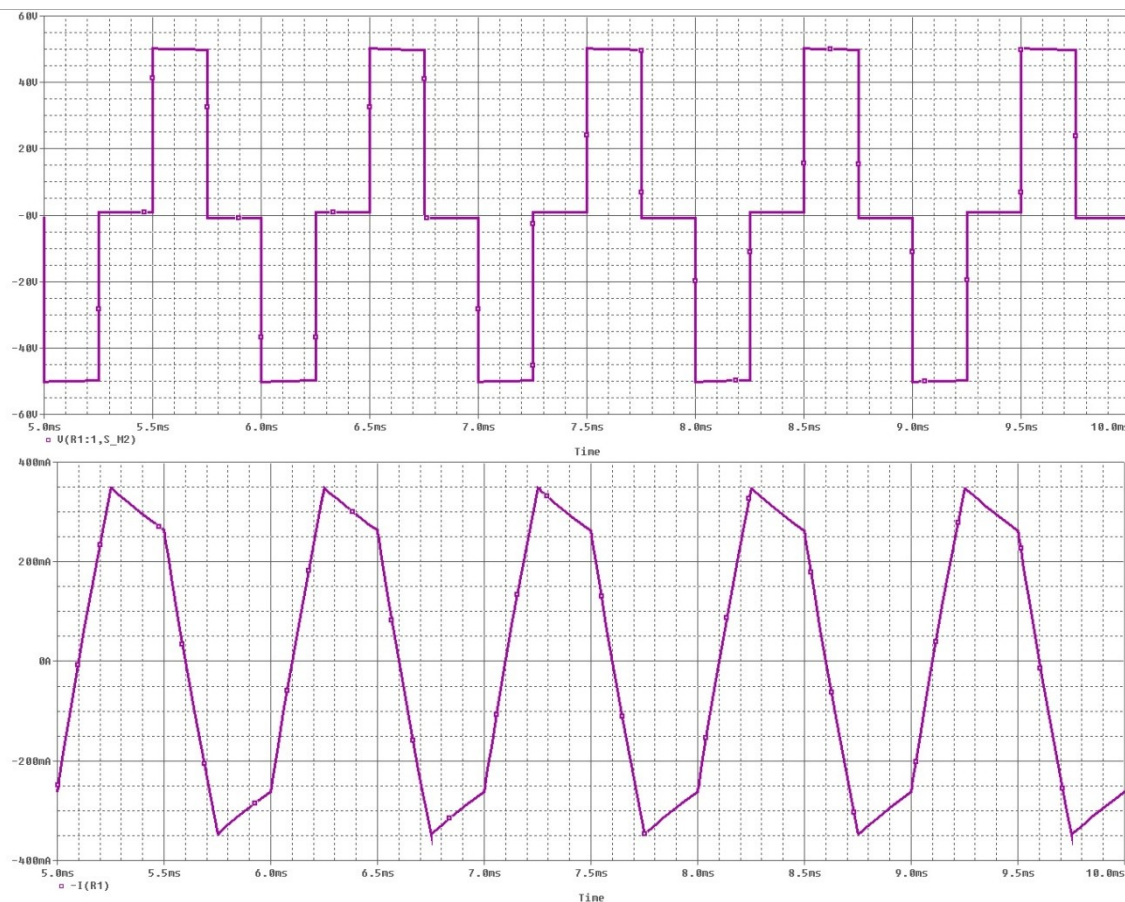
Příloha 1 - Průběhy a schémata jednofázového napětového střídače pro různé provozní stavy a zátěže	I
Příloha 2 - Průběhy trojfázového napětového střídače pro různé provozní stavy a zátěže	IV
Příloha 3 - Průběhy jednofázového proudového střídače pro různé provozní stavy a zátěže	VI
Příloha 4 - Průběhy trojfázového proudového střídače pro různé provozní stavy a zátěže	VIII
Příloha 5 - Průběhy jednofázového měniče napětí pro různé druhy zátěže	X
Příloha 6 - Průběhy trojfázového měniče napětí pro různé provozní stavy a zátěže	XII

Přílohy

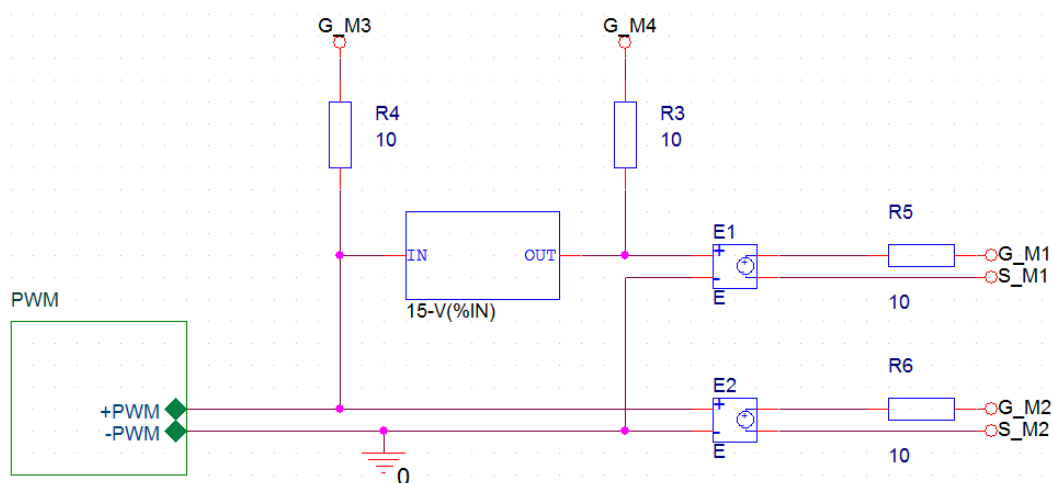
Příloha 1 - Průběhy a schémata jednofázového napětového střídače pro různé provozní stavy a zátěže



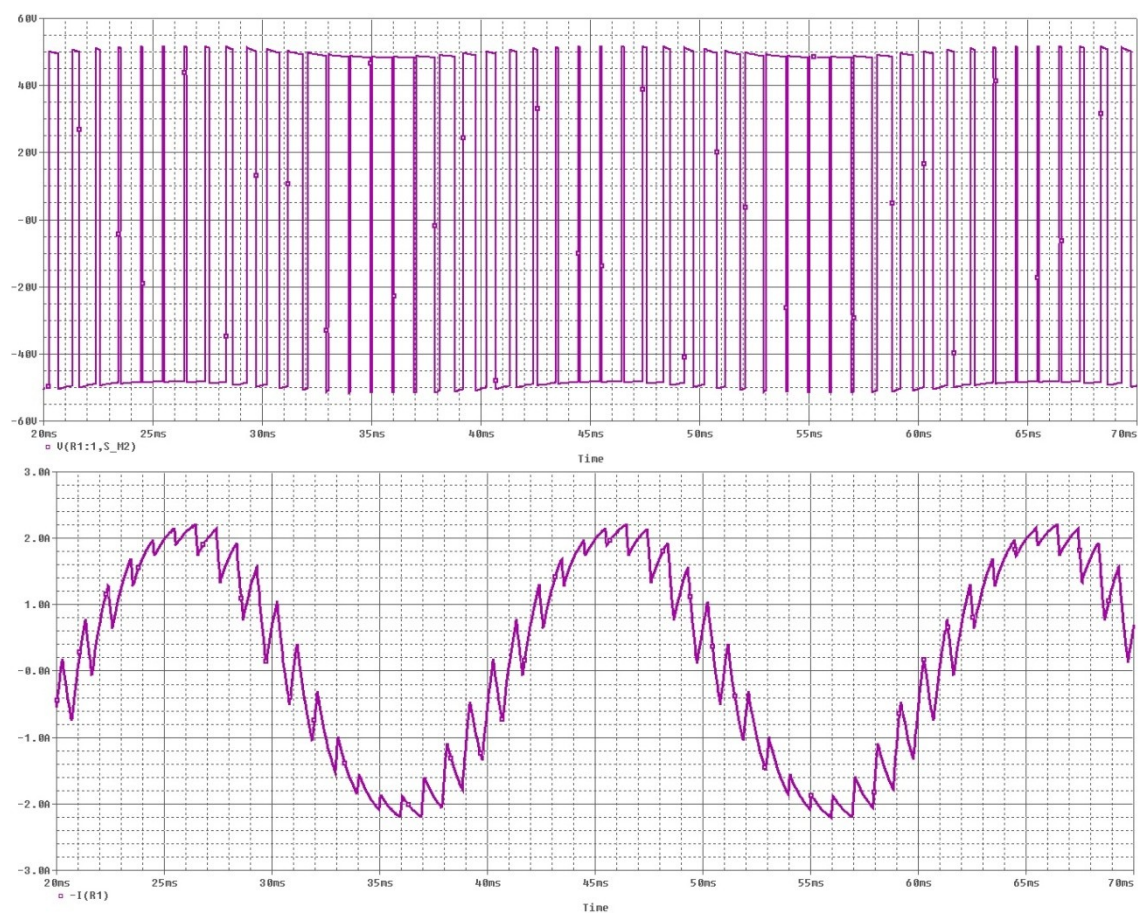
Obr 1. Výstupní napětí řídicích obvodů jednofázového napětového střídače pro $\psi = \pi$



Obr 2. Výstupní napětí a proud jednofázového napět'ového střídače $\psi = \pi/2$

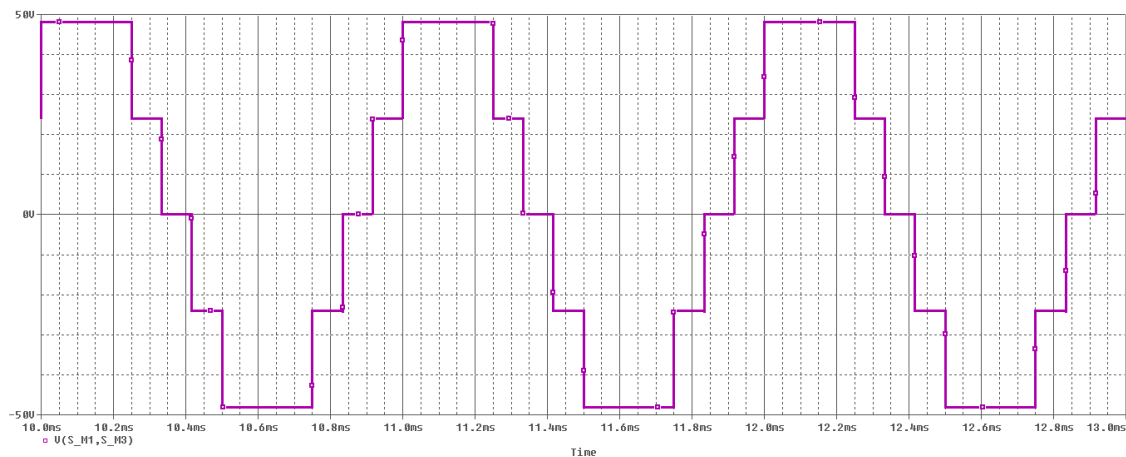


Obr 3. Schéma řídicího obvodu jednofázového napět'ového střídače pro PWM řízení

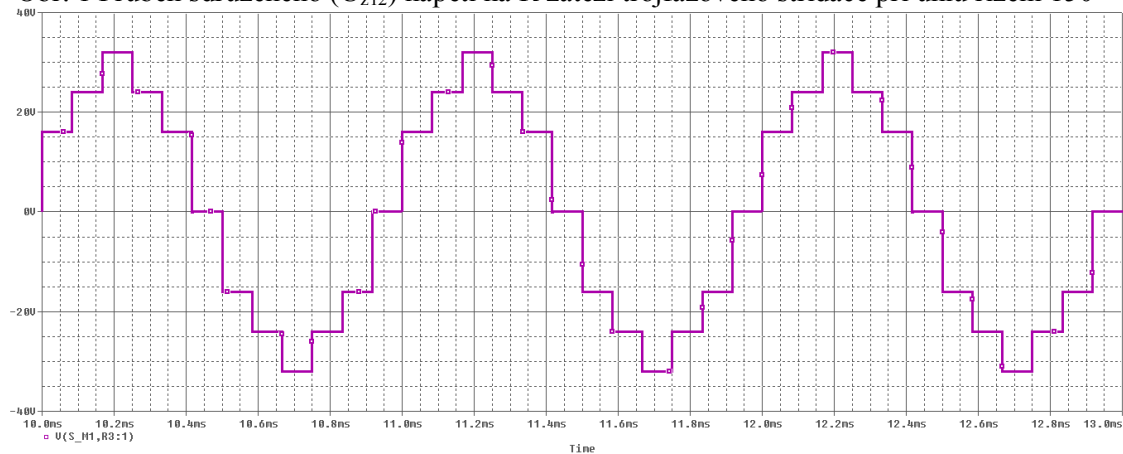


Obr. 4. Výstupní napětí a proud jednofázového napěťového střídače řízeného pomocí PWM

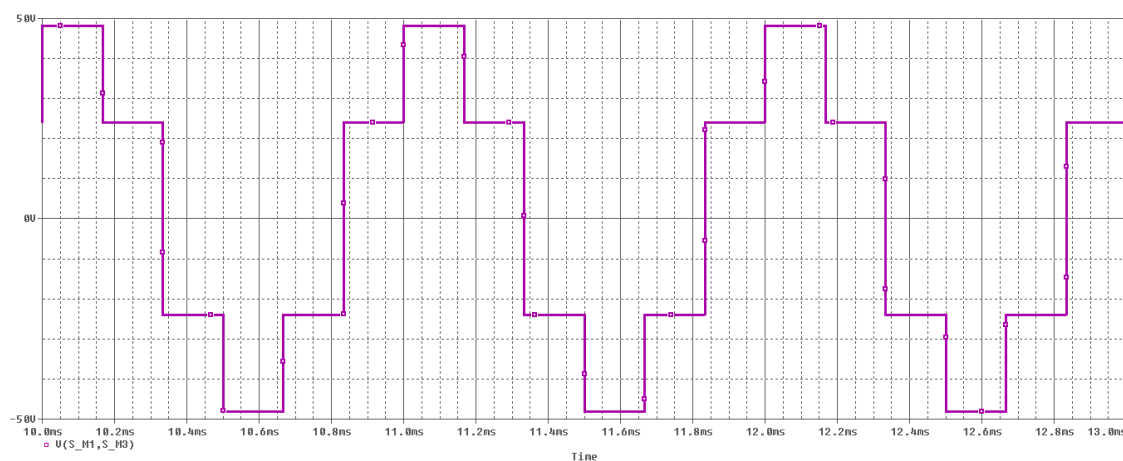
Příloha 2 - Průběhy trojfázového napětového střídače pro různé provozní stavy a zátěže



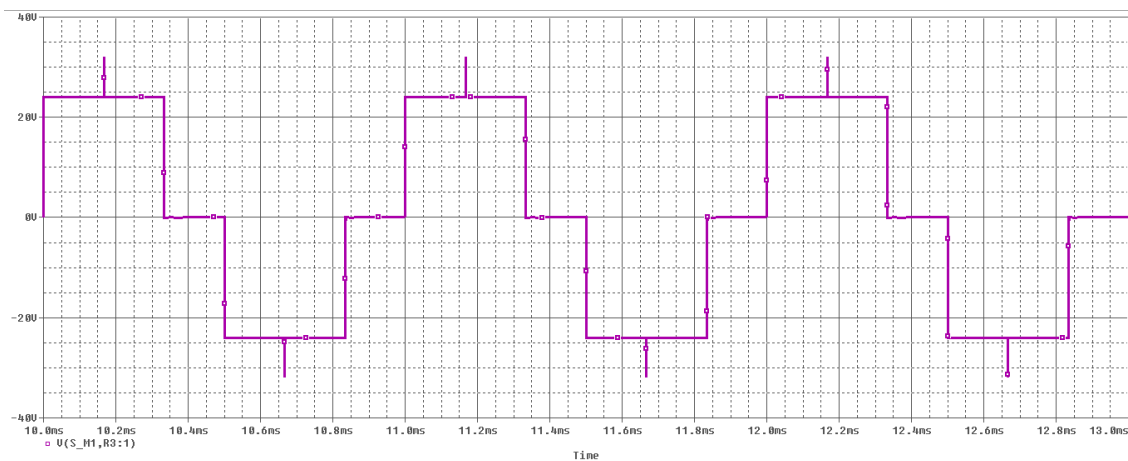
Obr. 1 Průběh sdruženého (U_{z12}) napětí na R zátěži trojfázového střídače při úhlu řízení 150°



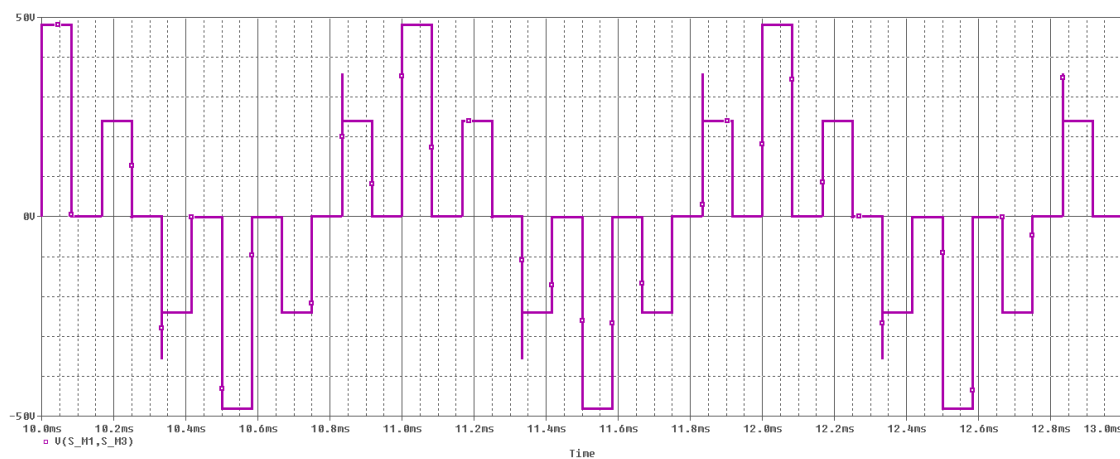
Obr. 2 Průběh fázového (U_{z1}) napětí na R zátěži trojfázového střídače při úhlu řízení 150°



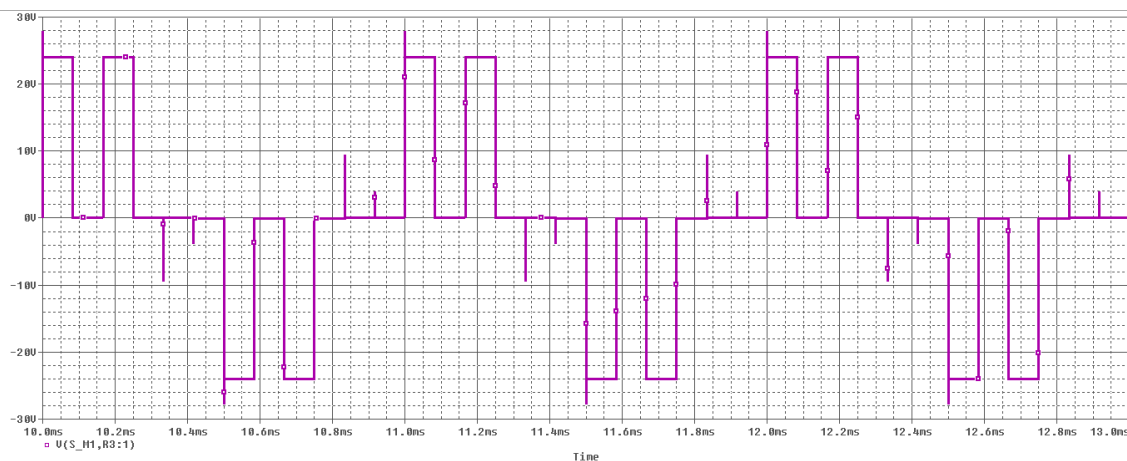
Obr. 3 Průběh sdruženého (U_{z12}) napětí na R zátěži trojfázového střídače při úhlu řízení 120°



Obr. 4 Průběh fázového (U_{z1}) napětí na R zátěži trojfázového střídače při úhlu řízení 120°

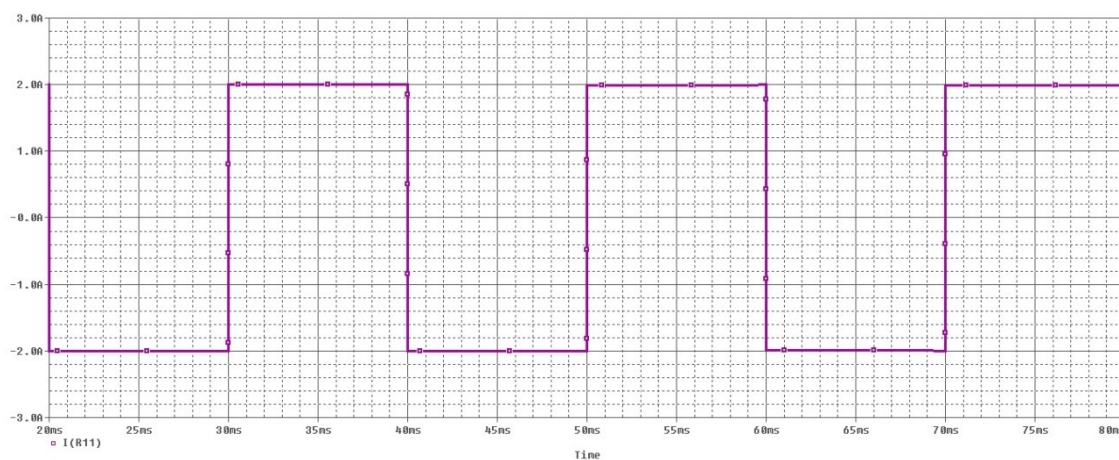


Obr. 5 Průběh sdruženého (U_{z12}) napětí na R zátěži trojfázového střídače při úhlu řízení 90°

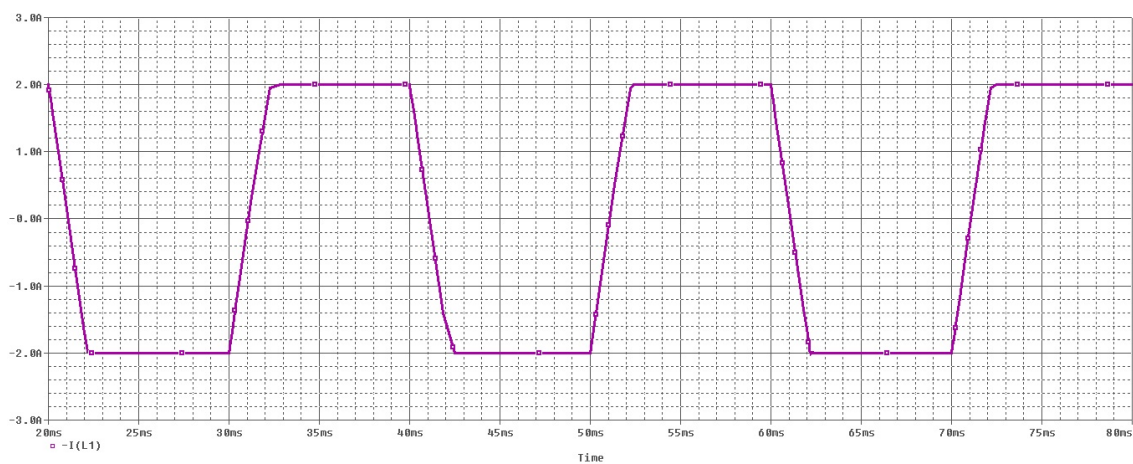


Obr. 6 Průběh fázového (U_{z1}) napětí na R zátěži trojfázového střídače při úhlu řízení 90°

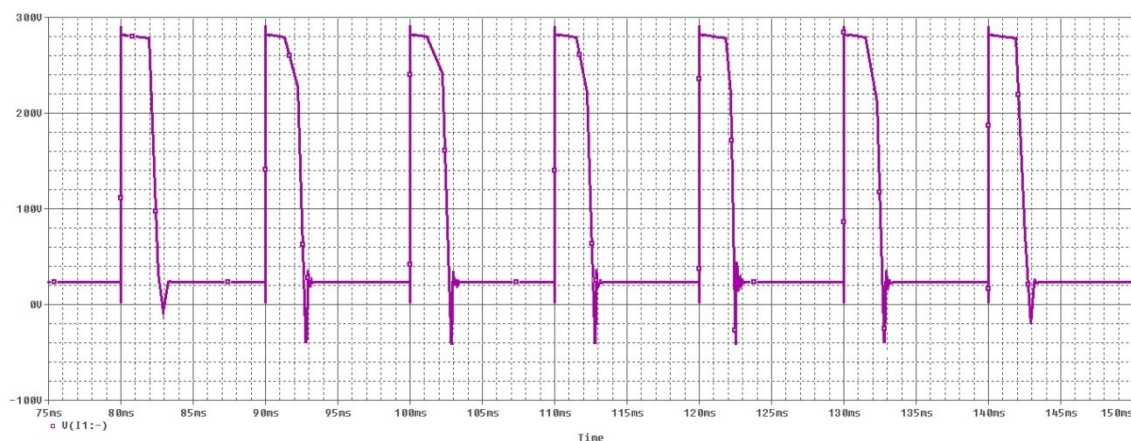
Příloha 3 - Průběhy jednofázového proudového střídače pro různé provozní stavy a zátěže



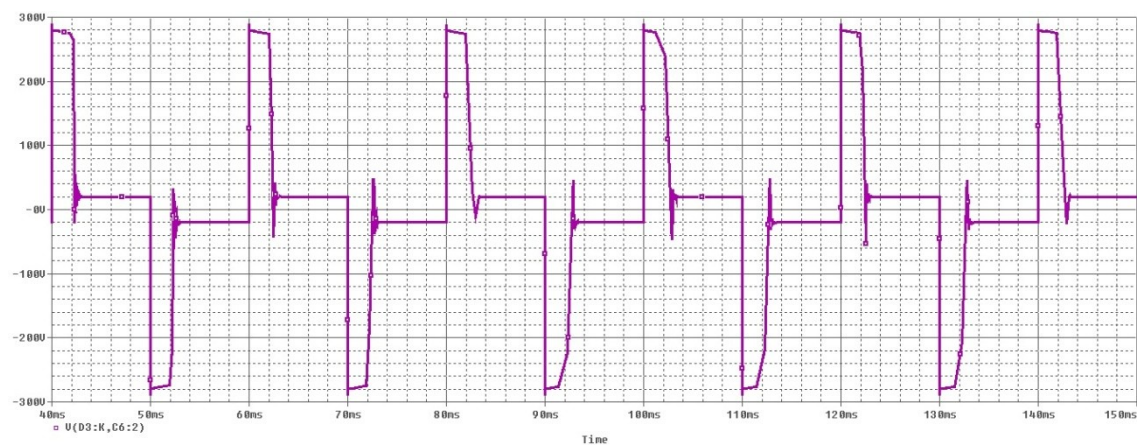
Obr. 1 Průběh proudu na R zátěži jednofázového proudového střídače



Obr. 2 Průběh proudu na L zátěži jednofázového proudového střídače

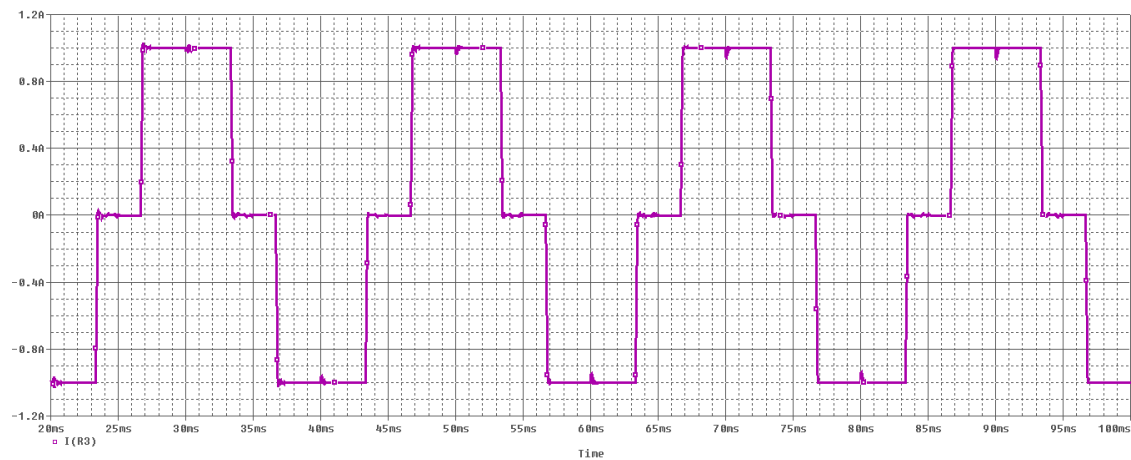


Obr. 3 Průběh napětí na stejnosměrném proudovém zdroji jednofázového proudového střídače

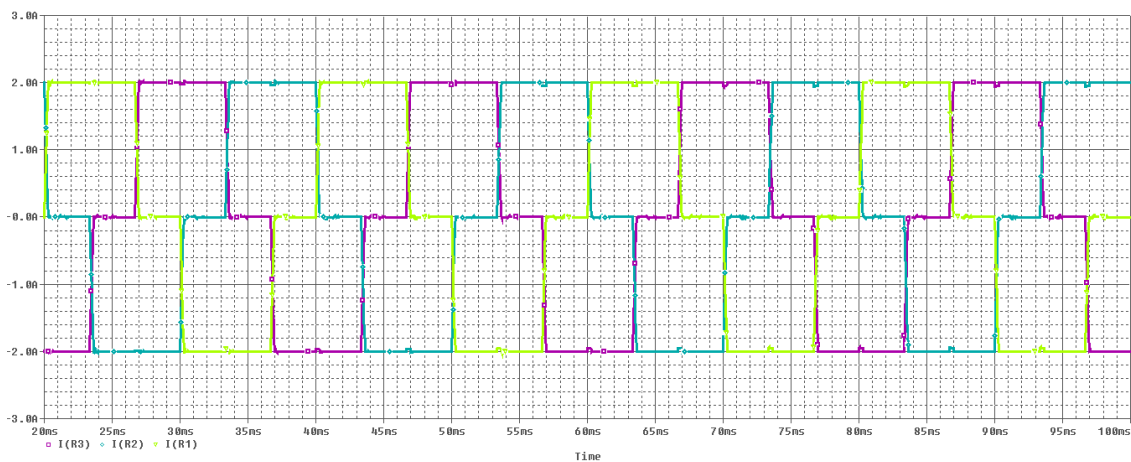


Obr. 4 Průběh napětí na R, L zátěži jednofázového proudového střídače

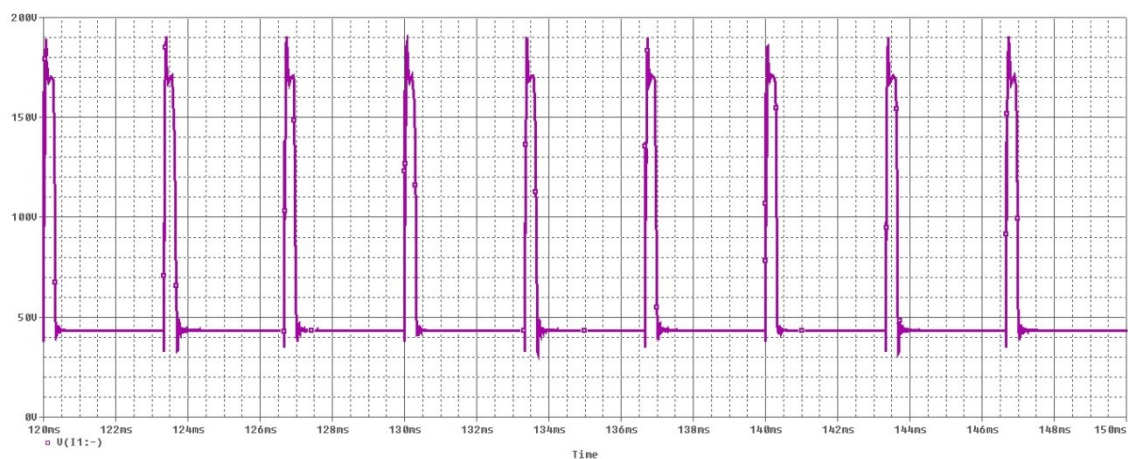
Příloha 4 - Průběhy trojfázového proudového střídače pro různé provozní stavy a zátěže



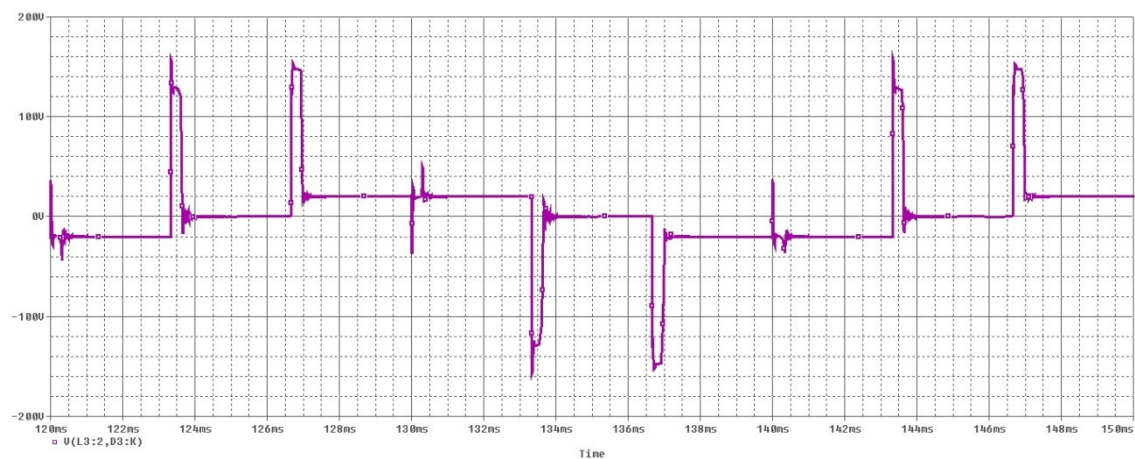
Obr. 1 Průběh Proudů na zátěži (I_{z1}) trojfázového proudového střídače při hodnotě stejnosměrného zdroje 1A



Obr. 2 Průběh Proudů na zátěži (I_{z1} , I_{z2} , I_{z3}) trojfázového proudového střídače při hodnotě stejnosměrného zdroje 2A

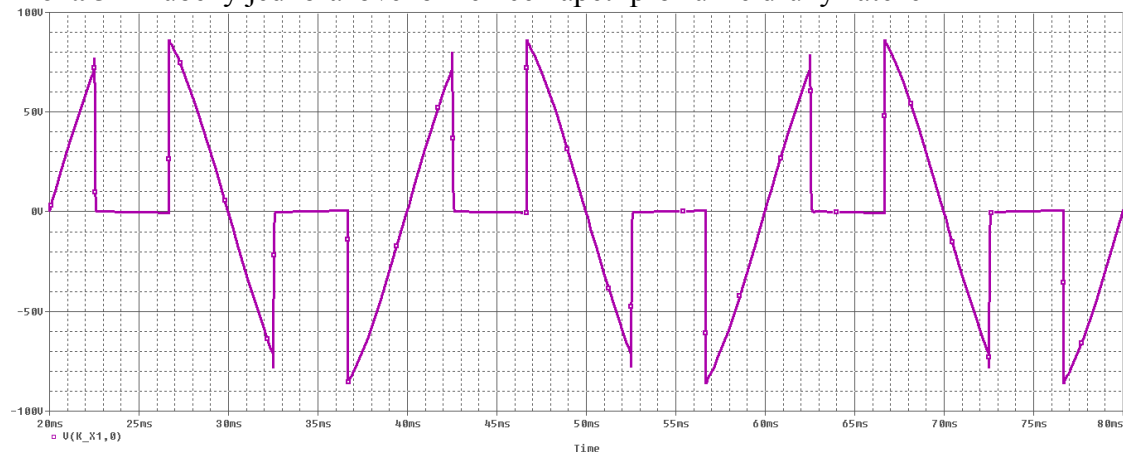


Obr. 3 průběh napětí na stejnosměrném proudovém zdroji (U_d) trojfázového proudového střídače



Obr. 4 Průběh napětí na zátěži (U_{z1}) trojfázového proudového střídače

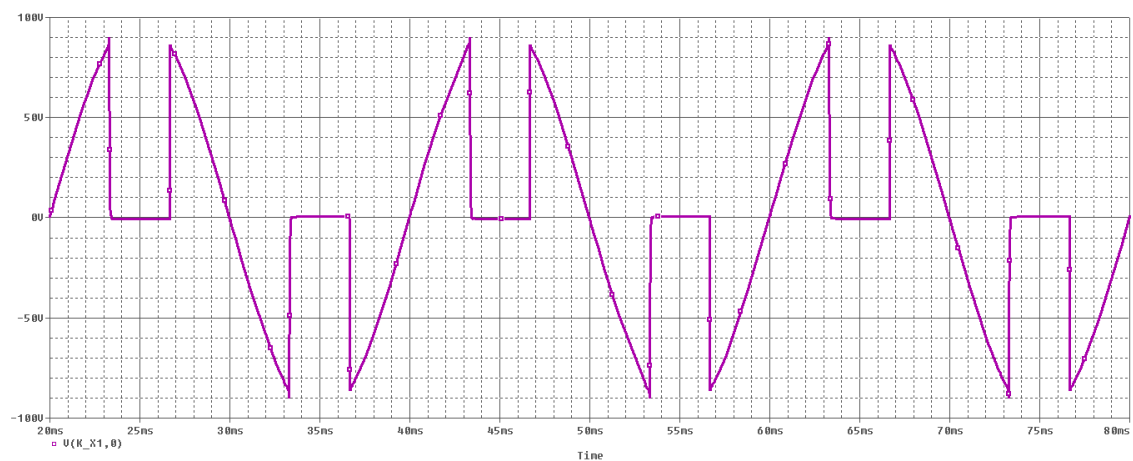
Příloha 5 - Průběhy jednofázového měniče napětí pro různé druhy zátěže



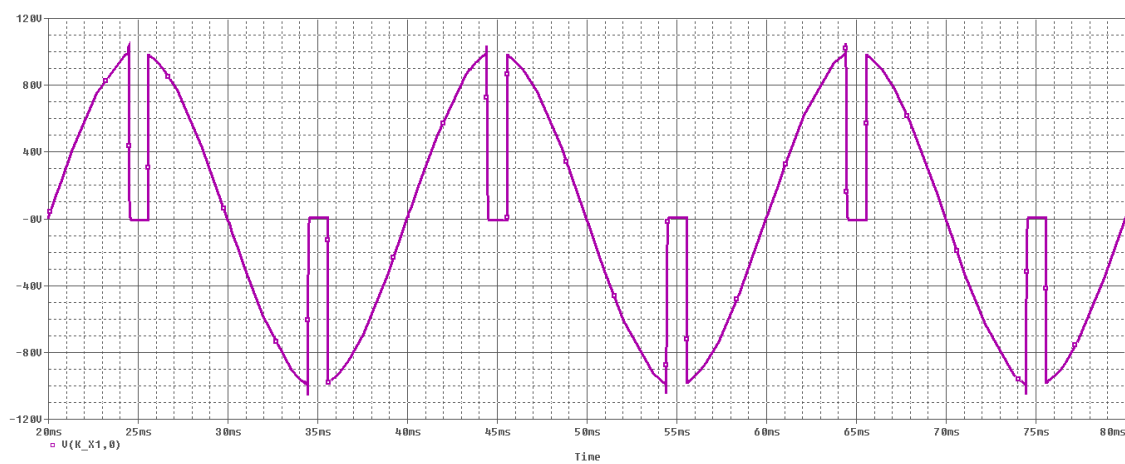
Obr. 1 Výstupní napětí na zátěži jednofázového střídavého měniče napětí pro R, L zátěž a úhel řízení 120°



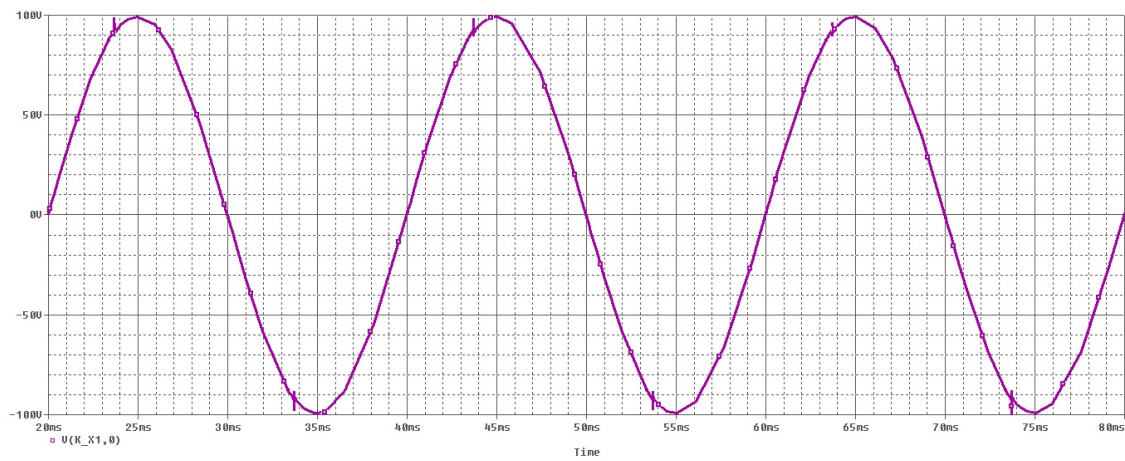
Obr. 2 Výstupní napětí na zátěži jednofázového střídavého měniče napětí pro R zátěž a úhel řízení 120°



Obr. 3 Výstupní napětí na zátěži jednofázového střídavého měniče napětí pro L zátěž a úhel řízení 120°

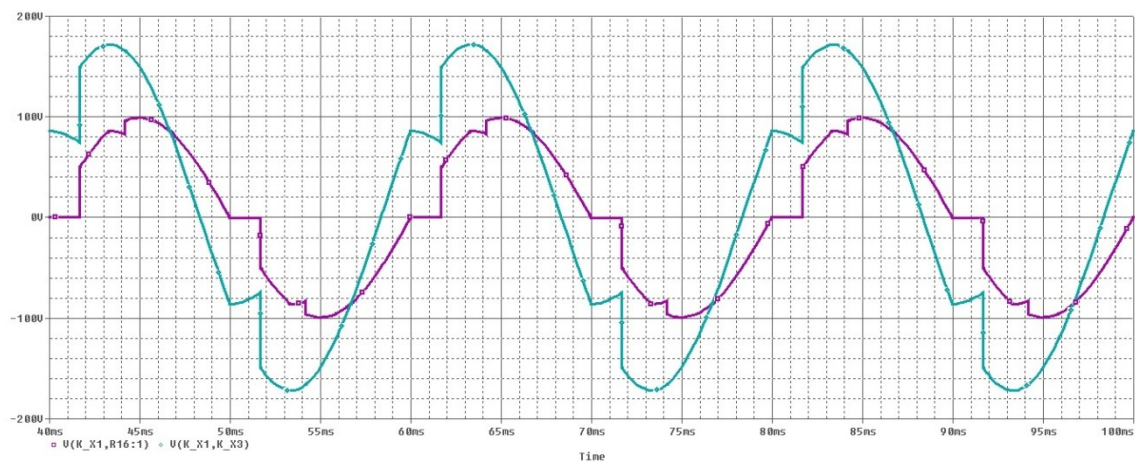


Obr. 4 Výstupní napětí na zátěži jednofázového střídavého měniče napětí pro L zátěž a úhel řízení 100°

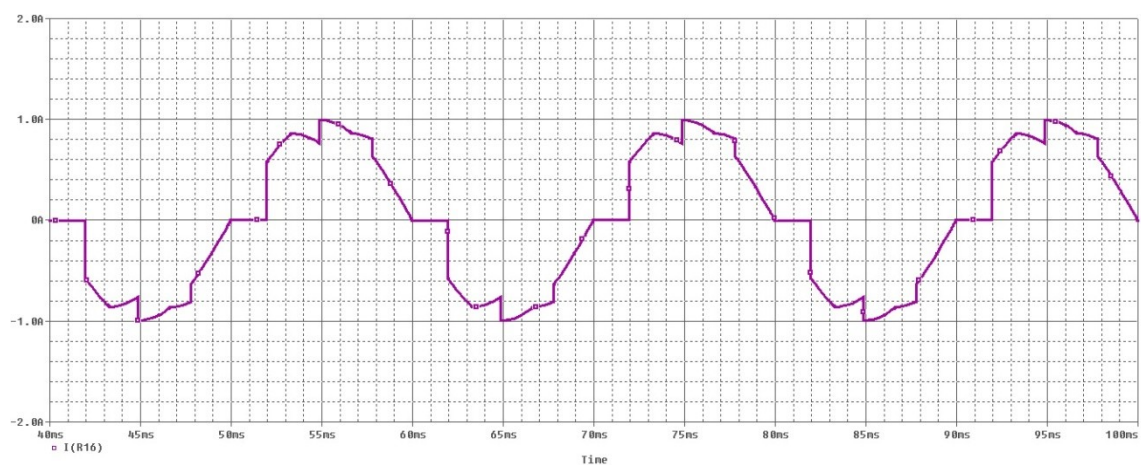


Obr. 5 Výstupní napětí na zátěži jednofázového střídavého měniče napětí pro R, L zátěž a úhel řízení 60°

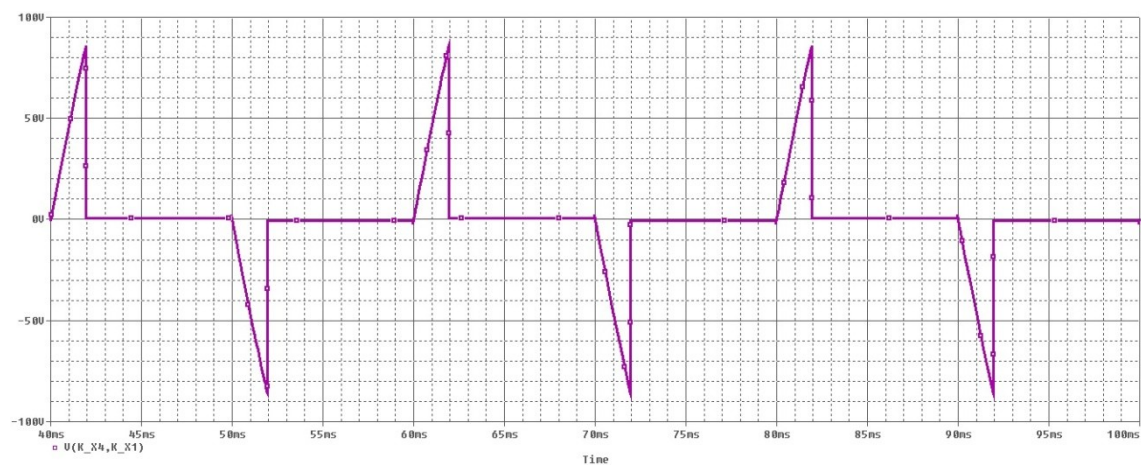
Příloha 6 - Průběhy trojfázového měniče napětí pro různé provozní stavy a zátěže



Obr. 1 Průběh napětí na zátěži a sdružené napětí trojfázového měniče napětí pro úhel řízení 30°



Obr. 1 Průběh proudu na zátěži trojfázového měniče napětí pro úhel řízení 30°



Obr. 3 Průběh napětí na dvojici součástek X1 a X4 trojfázového měniče napětí pro řídicí úhel 35°